

大規模没入ディスプレイの設計手法とその実装に関する研究

著者	鳥 光
発行年	2019
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2018
報告番号	12102甲第9216号
URL	http://doi.org/10.15068/00156320

大規模没入ディスプレイの設計手法と その実装に関する研究

2019年3月

高鳥 光

大規模没入ディスプレイの設計手法と
その実装に関する研究

高鳥 光

グローバル教育院
エンパワーメント情報学プログラム
筑波大学

2019 年 3 月

目次

第1章	序論	1
1.1	視覚提示に関する研究	1
1.1.1	ヘッドマウントディスプレイ	1
1.1.2	没入ディスプレイ	2
1.1.3	バーチャル環境構築ソフトウェア	3
1.1.4	バーチャル環境中の移動感覚提示	4
1.2	本研究の目的	5
1.3	内容梗概	6
第2章	大規模没入ディスプレイの設計指針	8
2.1	大規模化を前提とした没入ディスプレイ	8
2.1.1	本研究における没入ディスプレイの必要機能	8
2.1.2	大型化に適した視覚提示手法	9
2.2	ハードウェア設計指針	10
2.2.1	投影方式	10
2.2.2	プロジェクタ配置	12
2.2.3	前面投射が優位となるスクリーン規模の算出手法	13
2.2.4	スクリーン形状	16
2.2.5	視点位置のトラッキング	21
第3章	バーチャル環境構築ソフトウェア	23
3.1	視覚提示に必要なソフトウェアの枠組み	23
3.2	立体視可能な全周視覚情報の生成アルゴリズム	25
3.2.1	アルゴリズム概要	25

3.2.2	立体画像生成の基本原理と課題	26
3.2.3	水平方向全周化の手法と制約	26
3.2.4	スクリーン形状による投影映像の歪みとその補正	29
3.2.5	床面と天面に対する立体画像生成と歪み補正	30
第 4 章	LargeSpace 実装	32
4.1	投影系ハードウェアの実装	32
4.1.1	サイズおよび投影方式の検討	32
4.1.2	スクリーンの構築	32
4.1.3	プロジェクタ配置と立体視の実現	33
4.1.4	モーションキャプチャシステム	37
4.1.5	映像生成クラスタ計算機	37
4.2	バーチャル環境構築ソフトウェアの実装	39
4.2.1	投影歪み補正検証プロトタイプ	39
4.2.2	ゲームエンジンを利用したモデリングとシミュレーション環境	40
4.2.3	Unity 上でのレンダリングアルゴリズムの実装	40
第 5 章	LargeSpace の評価と考察	44
5.1	有効画素数と有効視野角	44
5.2	角分解能	45
5.3	体験空間容積率	46
5.4	前面投射方式における投影光遮蔽の問題	47
5.5	複合曲面スクリーンによる輝度変化軽減効果	48
第 6 章	大規模没入ディスプレイの応用	50
6.1	大規模没入ディスプレイにおける移動感覚提示	50
6.1.1	バーチャル環境内での移動感覚提示に関する従来研究	50
6.1.2	ワイヤー駆動モーションベースとの統合	50
6.2	アプリケーション	52
6.2.1	ウォークスルーアプリケーション	52
6.2.2	心理学実験のためのバーチャル実験環境	54

6.2.3	没入型インスタレーション	57
第7章	考察	62
7.1	提案手法の有効性	62
7.2	大規模没入ディスプレイが生成するバーチャル環境の有用性と課題 .	63
7.2.1	大規模没入ディスプレイを用いることの意義	63
7.2.2	視覚提示の品質に関する課題	64
7.3	本研究の展望	67
7.3.1	LargeSpace を活用するアプリケーションの広がり	67
7.3.2	異なる投影系とバーチャル環境構築ソフトウェア	68
7.3.3	大規模没入ディスプレイの展開	68
第8章	総括	70
8.1	研究要略	70
8.2	結言	72
	謝辞	73
	参考文献	74
	公表論文リスト	80
付録A	Unity 用 LargeSpace ライブラリの利用手順	82
A.1	Development Environment	82
A.2	How to import the asset	82

目 次

2.1	Front/Rear projection approach	10
2.2	Light blocking problem of front projection approach	11
2.3	Proper projector placement for enlarging the size of the display	13
2.4	Definition of screen aspect for calculation	14
2.5	Parameter definition for calculating effective width	14
2.6	Graph of boundary condition where effective width is same ($h = 1.7$) . . .	16
2.7	Simple curved screen model	17
2.8	DoF limitation of Projector1	18
2.9	DoF limitation of Projector2	18
3.1	Configuration diagram of virtual reality system generating visual stimulus	23
3.2	Conceptual processing flow of rendering	25
3.3	Standard method for rendering stereo images	26
3.4	Eye reversal problem when the user looks the opposite way from a screen	27
3.5	Virtual stereo cameras for rendering stereo-panoramic images	27
3.6	Rotated view frustum on rendering stereo-panoramic image	27
3.7	Sample virtual environment: "The Cathedral of St. James in Sibenik" . . .	28
3.8	Stereo-rendered images of sample virtual environment	28
3.9	Distortion correction method for panoramic and stereoscopic projection .	30
4.1	The screen dimensions of LargeSpace	33
4.2	Screen inter view (Photo by Katsuaki Sato)	34
4.3	Projector placement on the steel truss frame	35
4.4	Projection range of the projectors	35

4.5	Projection range on the floor screen	36
4.6	Surplus projection range of the projector projecting on the wall	36
4.7	Placement of the cameras for motion capture on the steel truss frame	37
4.8	Retroreflective markers for tracking the user's viewpoint	38
4.9	Connection schematic of projection system of the LargeSpace	38
4.10	Rendered virtual world inter view	39
4.11	Class diagram of LargeSpace rendering functions on Unity	41
4.12	Virtual environment to visualize	42
4.13	LargeSpace rendering algorithm executed on UnityEditor	42
4.14	View of the rendered virtual world composed by Unity	43
5.1	Field of view that can be covered when standing in the center of LargeSpace	44
5.2	8 directions for testing walkable area	47
5.3	Maximum walkable area without projection occluding by the participant	48
5.4	Luminance gradation at the corner of the screen	49
6.1	Construction of Wire-Driven Motionbase	51
6.2	Conducting floating experiment with the motionbase	52
6.3	Lighting settings of walkthrough application	53
6.4	CG models for measuring frame rate	54
6.5	Environment for experimental analysis of behavior. Virtual environment reproducing Tsukuba station with a virtual vehicle	56
6.6	Yokohama Chinatown model and immersion simulation	57
6.7	Installation of Flies in The Sky	58
6.8	Installation of Bird Song Diamond ～鳥の歌のきらめき～	59
7.1	Fresnel reflection on floor screen	65
7.2	Difference in distance of adjacent view volumes	66
7.3	Break of virtual object by visual volume division method	67

表 目 次

2.1	Methods of position and orientation measurement, and their features . . .	21
5.1	Calculated resolution of LargeSpace	45
5.2	Screen volume ratio of immersive display systems	46
5.3	Measurement result of the walkable area	48
6.1	Number of triangles, vertices and fps	53

第1章 序論

我々人間は感覚器を通し世界を知覚し，周囲の環境と相互に作用し合いながら生活している．特に視覚は，周囲の環境の奥行き，その広がり，物体の色，形状，材質感などを認識する上で極めて重要であるとされる [1]．したがって，人間にとっての現実世界を本質的に再現しようとするバーチャルリアリティ（VR）の研究分野においても，より高品質な視覚情報を提示する装置の開発が盛んに行われてきた．本研究では，視覚提示装置のうち没入ディスプレイを研究対象とする．そのため本章では，従来の視覚刺激提示に関する研究について概説し，本研究の位置付けを述べる．

1.1 視覚提示に関する研究

1.1.1 ヘッドマウントディスプレイ

人の動きに応じて人工的な視覚刺激を生成し提示する試みは，1968 年の Sutherland らの発表により本格化した [2]．この際提案されたのが，Head-Mounted Display(HMD)である．現在では，基本原理を同じくしてスマートフォンの部材等を利用した比較的安価な HMD が市販され，ゲーム機でも利用可能になるなど，一般家庭にも普及するに至っている．市販されるものの中にはスキー用のゴーグル程度の大きさでシステムが完結する製品もあるため現在の HMD は可搬性が高い視覚提示装置であると言える．また両眼立体視の実現方法について，左右の目に対して完全に独立した光学系で映像を提示できることから，後述のプロジェクタ投影などの手法と比較して，左右の映像のクロストークが発生しないという利点がある．

一方で従来から指摘されてきた主な問題点として以下が挙げられる

- 人間の視野角に対する表示可能視野角の狭さ
- 着脱の煩雑さ，固定具の圧迫感

- 対面コミュニケーションの阻害

表示可能視野角に関しては広範囲を覆うことができるものが発表され [3], 今後徐々に解消されていくものと考えられる. 一方, レンズを眼球の光軸に合わせてずれなく配置せねばならないという HMD の性質上, 装置を体験者の頭に頑丈に固定することは, 依然として必要である. 現在市販されている HMD は軽量なものでも 420 g ほどの重量があるが, この装置がずれないように固定されるのであれば, 体験者が強い圧迫感を感じるのは必然である. また HMD によって顔が覆われることは, 実世界での対面コミュニケーションにおいて非言語的なコミュニケーション手がかりの伝わりやすさに大きく影響することが明らかになっている [4]. これは, 体験者自身の身体や同じ空間にいる他者の動き, あるいは存在そのものについて, 全身の位置トラッキングなど特別な処理をしない限り認識できないことに起因する.

HMD が抱えるこれらの問題点は, VR 空間中での移動など体を積極的に動かす様な, またバーチャル空間を共有しながら議論を行う様なアプリケーションを想定した場合顕著になる.

1.1.2 没入ディスプレイ

前述の HMD の欠点を解決可能な視覚提示装置として, 大型スクリーンで体験者の周囲に映像を表示する没入ディスプレイが研究されてきた. 1993 年に Cruz-Neira らが発表した CAVE システムを発端に, その後それを発展させたシステムが多く開発された [5-7]. 没入ディスプレイでは, 体験者がどこを見てもスクリーンがある状況を作り出すことで人間の持つ視野全体を映像で覆う. これにより HMD の視野角に関する問題は解決されている. 次に体験時の装着の煩雑さや頭部の圧迫といった装着負荷に関する点だが, 没入ディスプレイによる視覚提示では立体視を実現するために, 映画館などでも使用されるシャッタ眼鏡を体験者に装着させることが多い. このシャッタ眼鏡の装着方法は, 視力矯正用のいわゆる通常の眼鏡と同様であり, またその重さは数十グラムと軽量である. 眼鏡には体験者の視点位置トラッキングに利用するマーカをつけることが多いが, それを含めたとしても重量は HMD より大幅に軽く, 体験者の装着負荷は低いと言える. この他に没入ディスプレイの特徴として, 複数人での VR 空間の共有と, VR 空間に没入中の対面コミュニケーションが比較的容易である点が挙げられる [8]. 没入ディスプレイにおいて映像が正しく見える視点は厳密には装置内部の 1 か所だが, その視点の近傍でもある程度違和感なく映像鑑賞が可能であ

るという性質が、VR 空間の共有を容易にしている。また体験中に他者や自身の身体が直接見えるため、非言語的なコミュニケーション手がかりの欠損が少なく、円滑なコミュニケーションが期待できる。この空間共有性とコミュニケーション容易性が、HMD とは根本的に異なる没入ディスプレイの特徴であり、没入ディスプレイを適用すべきアプリケーション領域を形作っていると言える [9]。さらに、自分自身の身体を視界の中に入れながら体性感覚を伴う行動をとることができるため、1/1 スケールの実寸感覚が得られるという利点があることも知られている [10]。

一方、没入ディスプレイはスクリーンや液晶ディスプレイなどで体験者を囲う必要があるため、体験者の移動可能範囲や没入中に利用可能な実験装置が限られる。この課題の最も直接的な解決方法は、システムを大型化して体験者が囲われている空間を広くとることである。しかし、体験者の内部での移動を考慮した VR システムとしての没入ディスプレイは、装置全体の規模に対し体験者が移動可能な空間を広く確保することが難しいことから、これまで一般的な議論がなされてこなかった。現在まで、例えば 10m を超えるような没入ディスプレイは商用などとして開発されているものの、それらはプラネタリウムに代表される全周動画の再生が目的であり、その内部での体験者の移動を考慮しないものであった [11, 12]。体験者が移動した際には、バーチャル空間中の視点位置もそれに応じて移動すべきである。この移動が実現されない場合、空間内でのインタラクティブ感と自己存在感が欠如し、「あたかも自分がその場にいる感覚」である臨場感が得られない。

1.1.3 バーチャル環境構築ソフトウェア

先に述べた通り、提示されたバーチャル空間中の視点移動を実現することは、行動に対する視界の変化という点で自己存在感とインタラクティブ感の創出のために重要である。その実現を考えるにあたっては、体験者の視点位置を追従するためのハードウェアに加えて、バーチャル空間を構築しその内部での視野を適切に生成するソフトウェアについても当然考慮せねばならない。

バーチャル空間を没入ディスプレイに対して正しく表示するためのソフトウェアの枠組みは、これまで多く開発されてきた。現在、商用のものでは CAVELib [13]（元は Cruz-Neira らの開発したソフトウェア）や getReal3D [14]、研究機関によって開発されてきたものとしては VR Juggler [15] や CAVE2 に用いられる Omegalib [16] が代表的である。これらは体験者の視点移動や立体映像の提示にも対応できるが、商用のも

のはいずれもソースコードが非公開であったり、当然ながら有償であったりする。これは、没入ディスプレイを用いたコンテンツをインターネット上で無償公開したり世界的に普及させたいと考えている場合に障害となる。VR Juggler や Omegalib は無償かつオープンソースのプロジェクトとして開発されている。しかし、提示したいバーチャル空間の構築にあたっては、没入ディスプレイ開発者のみならずそれを利用するアプリケーション開発者においてもコンピュータグラフィックス（CG）プログラミングに関する専門的な知識が必要であるため、容易に環境を組み上げられるとは言い難い。また VR Juggler では、没入ディスプレイのスクリーンは平面で構成されていると仮定されており、曲面スクリーンは定義できない。Omegalib ではワープ変形可能な2次元メッシュを定義することで曲面スクリーンに対応できるが、構成する曲面ごとにその変形量などを分けて定義する必要があるため、複雑な形状のスクリーンへの適用は容易で無いことがわかる。

以上より、没入ディスプレイでの映像提示を考える場合は、より容易にバーチャル環境を構築するためのソフトウェアの枠組みについても熟慮する必要がある。

1.1.4 バーチャル環境中の移動感覚提示

体験者がバーチャル空間を移動する際、実空間でも同様の移動を行うことができれば、前庭感覚や体性感覚を伴った VR 体験が実現できる。しかし、バーチャル空間は理論上無限の広さをもたせることも可能である一方で、体験者が現実に移動可能な空間は有限である。この問題について、実際に移動できる空間よりも広い VR 空間を提示するための試みとして、体験者の移動量を打ち消す装置が研究されてきた。人間が移動する際の手段として最も生得的なものは歩行であるが、大野らの報告によれば、歩行動作と映像刺激とを組み合わせたバーチャル空間中の移動表現によって、映像刺激のみによる移動表現よりも移動距離の推定がより正確になることが示唆されている [17]。そこで、歩行動作を実現しつつその移動量を打ち消すための装置として、歩行感覚提示装置が提案されている [18–20]。

これらの装置は理論上無限の歩行面を提示でき、地面からの反力や移動に伴う前庭感覚・体性感覚を提示可能とされている。一方で、例えばトレッドミル上での歩行は平地歩行と比較して人間の感じ方が異なることが分かっている。久保らの報告によれば、それぞれの実験条件において主観的速度知覚が異なるとしている [21]。それ以外にも主観的運動強度、筋活動、足関節角、運動中の心拍数など多くの点において平地

歩行とは異なるという結果が示されている [22,23]. これらより, 歩行感覚提示装置上での移動は実空間中での移動と同質であるとは断言できないことがわかる. したがって, 没入ディスプレイの内部で歩行による移動感覚を提示しようとする場合は, 理想を述べれば, 体験者が移動可能な空間を十分な広さで用意し, 実際に歩行することでバーチャル空間内を移動できる状態を実現できれば最もよい.

1.2 本研究の目的

前節で述べた没入ディスプレイについて, HMD と比較した際の利点と, それがもつ課題は次の通りである.

没入ディスプレイの特徴

HMD に対する利点

- 装置着脱の煩雑さ, 固定具の圧迫感が少ない
- バーチャル空間内で見ているものを複数名で共有することが比較的容易
- 対面コミュニケーションにおける非言語的コミュニケーション手がかりの欠損が少ない
- 物の基準として体験者自身の身体が見えるため VR 環境内でもスケールを把握しやすい

課題

- その構造により体験空間が高々数メートル四方に限られる
- コンテンツの公開を前提とし, なおかつ容易にバーチャル環境を構築可能なソフトウェアの枠組みが存在しない

上記の通り没入ディスプレイはその構造により体験空間が制限されるが, これによって体験者の移動を伴う実験は歩行感覚提示装置の併用を強いられ, また導入可能な実験装置の大きさも制限を受けていた. したがって以下を本研究の目的とする.

本研究の目的

没入ディスプレイにおける実験器具や体験者の移動可能範囲の制限について、利点は維持しながら、システムの大型化によって解決すること

より具体的には、没入ディスプレイの大型化にあたってそれを設計するための指針を示し、それに則った大規模没入ディスプレイを構築する。この際、没入ディスプレイを用いたバーチャル空間の提示がより簡便になる、バーチャル環境構築ソフトウェアについても提案する。

1.3 内容梗概

本学位請求論文はこの第1章を含め8つの章から構成される。

第1章では、従来の視覚提示に関する研究について概説し、没入ディスプレイの特徴と解決すべき課題について整理し本研究の目的を明確にした。

この目的の達成のために、第2章では大規模な没入ディスプレイを構築することを前提としたときに必要となるハードウェアの設計指針について議論する。まず没入ディスプレイを設計する際に考慮すべき事柄を挙げ、さらに大規模システム特有の要件について述べる。これらの考慮事項を踏まえて、装置を設計する上で検討すべき項目と現状の最適構成を述べる。また、大規模化に適した映像投射方式について議論する。

第3章では、没入ディスプレイに実装すべきバーチャル環境構築ソフトウェアについて、それを構成する要素について述べた後、レンダリング処理に注目し、没入ディスプレイ一般に適用可能な描画アルゴリズムを提案する。本提案手法は、曲面を含むような複雑な形状を有する没入ディスプレイにおいても、スクリーンサーフェスモデルとプロジェクタパラメータを入力するだけで、水平方向全周における立体視とトラッキングされた体験者に対する歪みのないバーチャル空間の見えを提示可能である。

第4章では、ここまでで提案してきたハードウェア、ソフトウェアの設計指針に則り、実際に大規模没入ディスプレイ LargeSpace を実装することで、提案の有用性を実証する。また、先のレンダリングアルゴリズムとゲームエンジンを統合した、汎用性の高いバーチャル環境構築ソフトウェアについて解説する。

第5章では LargeSpace の評価・考察を行う。まず基本性能について言及する。そ

の後，前面投射方式を採用したことで発生した課題について検証し，実質的に移動可能な範囲に関する計測結果をまとめる．複合曲面スクリーンによる輝度変化軽減効果についても議論し，その有効性を確認する．

第6章では，大規模没入ディスプレイの応用として，ワイヤー駆動モーションベースとの統合による移動感覚提示，ウォークスルーアプリケーション，実験心理学のためのバーチャルな実験環境，芸術応用としての没入型インスタレーションを実装し，大規模没入ディスプレイの利用可能性を示す．

第7章では全体を通した考察を行い，改めて本研究での提案の有用性を確認する．その後，大規模没入ディスプレイがもたらす価値，大規模没入ディスプレイにおける視覚提示の品質に関する課題を指摘し，解説する．さらに本研究の展望として，LargeSpaceのアプリケーション，バーチャル環境構築ソフトウェア，そして大規模没入ディスプレイ一般についての今後の可能性について言及する．

最終章では，本研究全体を総ざらいしまとめた上で，結言を述べる．

第2章 大規模没入ディスプレイの設計指針

2.1 大規模化を前提とした没入ディスプレイ

2.1.1 本研究における没入ディスプレイの必要機能

視覚ディスプレイの基本的な役割は，バーチャル空間の奥行き，その広がり，物体の色，形状，材質感など，バーチャル空間を把握するための情報を体験者に与えることである．没入ディスプレイにおいて，特に奥行き，広がりの実現するために必要な能力を以下に示す．

機能要件

- 人間の視野の広範囲にわたり刺激提示ができること
- 両眼視差を表現可能であること
- 運動視差を表現可能であること

第1.1節でも述べたように，これまでの没入ディスプレイでは構成するスクリーンなどで囲われる体験空間の大きさが制約となり，体験者の移動可能範囲や没入中に利用可能な実験装置が制限されてきた．そのため本研究では，体験空間が十分に広い大規模な全周ディスプレイの構築を目指す．

ここでいう体験空間の“十分な広さ”はコンテンツに依存する．コンテンツの例として，「無限の長さのバーチャルな廊下を直進し続ける」というウォークスルー体験を考えてみる．この場合，本来であれば体験者は無限に直進しつづけるため無限の広さの体験空間が必要である．この必要体験空間を小さくする手法として，Redirected

Walking が提案されている。Redirected Walking は、歩行する体験者が見るバーチャル空間を、体験者を軸に少しずつヨー回転させることによって、体験者には直進しているように感じさせながらも、実際には円を描いて歩かせることができる手法である。Steinicke らによれば、これを実現するためには直径 44m の体験空間が必要であることが報告されている [24]。これを基準として没入ディスプレイの実装を考えた場合、少なくとも 50m 四方程度の無柱空間を用意しなければならないことになる。現実問題として、装置設置のためにこれほどの広さを用意することは難しい。また当然ながら、直進だけではなく体験者が自由に移動するような VR コンテンツの場合は Redirected Walking の手法では対処できず、50m 四方の空間でも十分とは言い切れなくなる。

以上より、あらゆるコンテンツに対して十分な広さを確保するには、やはり無限の広さの体験空間が必要になると言える。これを装置の設計の観点から言い換えれば、設置できる空間は有限であるから、装置はその部屋の中で最も体験空間を広く取れる構造にすべきであるということになる。

故に、大規模没入ディスプレイを設計するにあたっては、その装置全体の体積における体験空間の占める割合をいかにして高めるか、ということが重要となる。

大規模没入ディスプレイ特有の追加要件

- 装置の全体体積に占める体験空間の割合を高め、体験空間を最大限広く確保できる構成であること

2.1.2 大型化に適した視覚提示手法

体験者の視野を広く覆うと同時に両眼立体視を実現可能な視覚提示手法として、CAVE のようにプロジェクタによってスクリーンへ映像を投影する手法、大型の液晶ディスプレイを複数台組み合わせて映像を表示する手法、LED アレイとパララックスバリアを体験者の周りに配置し回転させる手法などが提案されている [5, 25, 26]。システムを大型化するためには、大きな映像面を継ぎ目が目立たない形で構成することが必要となる。また体験者が歩行する面においては、その荷重に耐えられる素材を利用しなければならない。これらを考慮すれば、人が自由に歩き回れるほどの大型ディスプレイを構築するにあたっては、現時点ではプロジェクタ投影によるシステム（プロジェクション方式）が最も適しているといえることができる。したがって、ここでは

プロジェクション方式の大規模没入ディスプレイを設計する際に検討すべき点について議論を進める。

2.2 ハードウェア設計指針

2.2.1 投影方式

プロジェクション方式を用いる没入ディスプレイにおいて、映像をスクリーン上に投影する方法として、体験者から見てスクリーンの表から投影する前面投射 (Fig. 2.1a) と、裏から投影する背面投射 (Fig. 2.1b) がある。大型のシステムを構築するにあたって、そのどちらを採用すべきかについて議論する。

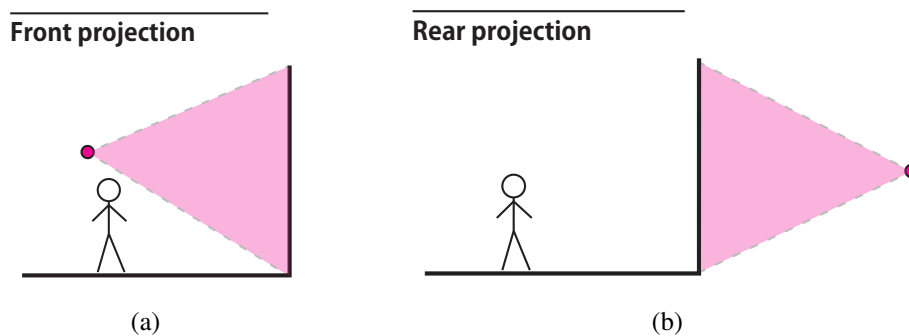


Fig. 2.1: Front/Rear projection approach

CAVE に代表される背面投射方式では投影光が体験者に遮蔽されないという利点がある。また、室内光の影響を受けにくく、スクリーン背面を暗室にすることで比較的高いコントラストの映像の提示が可能である。さらに、スクリーンの外側にプロジェクタを設置するため、上下を含む全ての面を映像で覆う体験空間を構築できる。しかし、結像のためにプロジェクタとスクリーンの間に十分な距離をとる必要があることから、プロジェクタをスクリーン外に配置するこの方式では体験者のいるスクリーン内部に比べ、映像投影のために確保しなければならないバックヤードが非常に大きくなる。つまり設置空間に対して移動可能な内部空間の割合が小さくなる。加えて、半透過型のスクリーンを用いる必要があり、高い輝度を実現しようとするスクリーンを透かして光源が見えてしまうという問題がある。さらに、投影光を遮らないような

スクリーンの固定方法についても検討する必要がある。また大型のスクリーンはしばしば分割して作成されるが、これらを均一な透過率を保ちつつ接続しなければならない。以上の問題は大型の没入ディスプレイを構築する上で大きな障壁となる。

一方で前面投射方式では、単純にプロジェクタの出力を上げることで高い輝度が実現でき、またスクリーンの内側から映像を投射するため、大型化の際に特に問題となるバックヤードを大幅に縮小できる。さらに、映像の質に直接影響しないスクリーンの背面を自由に使用できるため、背面投射方式に比べスクリーンの接続や固定処理の自由度が高い。この方法で実現された没入ディスプレイとして、Ars Electronica Future Lab. の DeepSpace があげられる [27]。このシステムは全周を覆うものではないものの、縦9m 横16m の大型スクリーンを壁面と床面の2面に配置し、前面投射方式での映像提示を実現している。しかし前面投射方式では、先述の通り投影光が体験者に遮蔽されてしまうことが問題となる (Fig. 2.2)。また、映像を投影するプロジェクタがスクリーン内部に存在するため体験者の視線に入ってしまうことや、プロジェクタへの配線や投影光の導入のためにスクリーンの一部を開放しなければならないことも、空間的な広がりを感じる包囲感を下げる要因となる。没入ディスプレイにおける映像の欠損は提示する3次元空間の欠損を意味し、包囲感の減少から臨場感低下を招く。

以上から、構造的には前面投射方式が大型化に向いているものの、映像の欠損を最小化する必要があることがわかる。以下に、前面投射方式の特徴をまとめる。

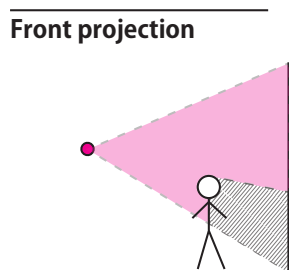


Fig. 2.2: Light blocking problem of front projection approach

大規模化における前面投射方式の優位性と課題

- 背面投射方式と比べて大規模化しやすい構造的特徴を持つ
 - － 分割して作成されたスクリーンの接続や固定処理の自由度が高い
 - － 投映像結像のために必要だったバックヤードを省略でき、体験空間の割合を高められる
- 映像の欠損が生じる問題について検討する必要がある
 - － プロジェクタからの投影光が体験者に遮蔽されてしまうことがある
 - － プロジェクタを体験空間の内部に配置する必要があったり、プロジェクタへの配線や投影光の導入のためにスクリーンの一部を開放したりしなければならない

2.2.2 プロジェクタ配置

前述の、体験者による投影光遮蔽問題とプロジェクタによる視界遮蔽問題へのアプローチとして、表面鏡を利用しプロジェクタの投影光の経路を曲げる手法が提案されている [28]。しかしディスプレイの大型化の際にはより大きく均一な品質の鏡が必要となるため、実装上現実的ではない。従って大規模ディスプレイにおいてはまず、プロジェクタ配置を工夫することを考える。

壁面全周をスクリーンで覆い、また歩行時には地面を見ることから床面にも映像を提示することを考えた場合、プロジェクタは天面に設置することとなる。このとき、投影光が結像するために必要な距離を十分にもうけつつ、なおかつ体験者による遮蔽が少なくなるようにプロジェクタを可能な限り鉛直下向きに設置しなければならない (Fig. 2.3a)。一方でプロジェクタが体験者の視界に入ることが極力避けることや、極端な斜め投影でプロジェクタの投影像が大きく台形に歪んでしまったり被写界深度が不足したりすることについても考慮が必要となる。したがって現実的には、プロジェクタは投影するスクリーンに対し反対側のスクリーンの上端に設置するのが、バックヤードを最小に保ちつつ、なおかつ投影距離を十分に得られる方法ということがで

きる (Fig. 2.3b). この配置にすることで, 天井のその他の位置に固定するよりもプロジェクタ本体とその配線を体験者の目から比較的容易に隠すことができる. また, スクリーンを固定する構造体を利用してプロジェクタの固定もできるという利点もある.

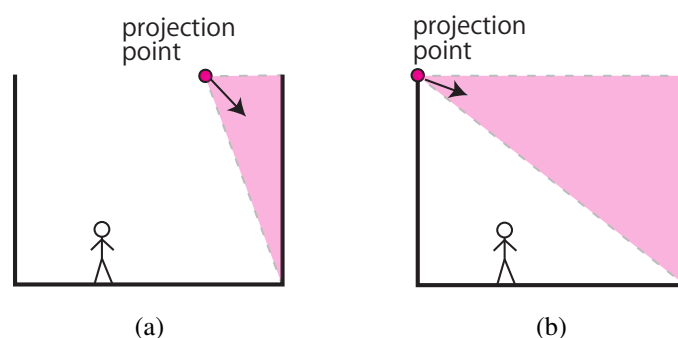


Fig. 2.3: Proper projector placement for enlarging the size of the display

プロジェクタの最適配置

- 映像を投影するスクリーンの反対側の上端に設置する (Fig. 2.3b)
 - バックヤードが最小である状態が維持されている
 - 投影に必要な距離を十分に得ることができる
 - 体験者の目からプロジェクタと配線を比較的容易に隠すことができる

2.2.3 前面投射が優位となるスクリーン規模の算出手法

前項で示した最適配置をした場合でも, 体験者が投影光を遮蔽してしまう課題は依然として残ったままである. ゆえに, 体験者が投影光を遮蔽しない範囲を移動可能範囲としたときに, 本当に前面投射方式の方が背面投射方式より広い移動可能範囲を確保できるのか検証する必要がある.

前面投射方式と背面投射方式, それぞれにおいて “壁面スクリーンに対する投影像” について, 映像欠損が起きない体験空間の大きさ (有効範囲) を式で表すことを考え

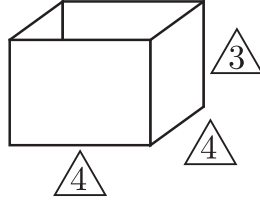


Fig. 2.4: Definition of screen aspect for calculation

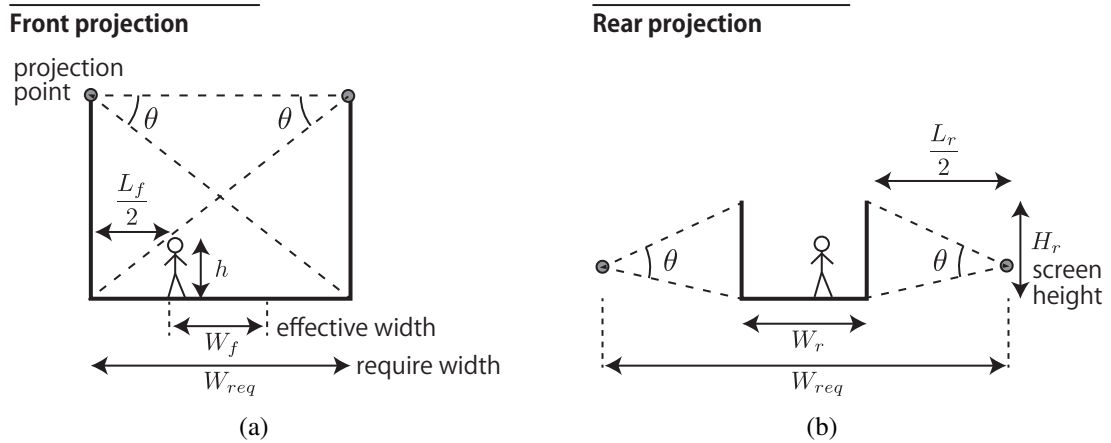


Fig. 2.5: Parameter definition for calculating effective width

る。簡単のため、スクリーンは Fig. 2.4 のように、幅と高さの比を 4 : 3 とし、それぞれの面への映像投影に 1 つのプロジェクタを割り当てるものとする。大規模な装置を想定するため、鏡などでの反射は行わず、スクリーンへの直接投影とする。ここで、Fig. 2.5 に示す装置の断面を考え、身長 h の人物が投影光を遮蔽することなく移動可能な有効範囲を有効幅 W_f , W_r 、装置設置に必要な幅を W_{req} として計算する。 θ はプロジェクタの投影画角、 L_f , L_r は必要幅から有効幅を差し引いた損失幅である。まず前面投射方式において W_f を求める。

$$W_f = W_{req} - L_f \quad (2.1)$$

ここで、 L_f は

$$h = \frac{L_f}{2} \tan \theta \quad \Rightarrow \quad L_f = \frac{2h}{\tan \theta} \quad (\because \tan \theta \neq 0) \quad (2.2)$$

となる． よって Eq. 2.1, Eq. 2.2より W_f は

$$W_f = W_{req} - \frac{2h}{\tan \theta} \quad (2.3)$$

となる．

続いて背面投射方式において W_r は

$$W_r = W_{req} - L_r \quad (2.4)$$

と表される． ここで, L_r は

$$\begin{aligned} \frac{H_r}{2} &= \frac{L_r}{2} \tan \frac{\theta}{2} \\ \Rightarrow L_r &= \frac{H_r}{\tan \frac{\theta}{2}} \quad \left(\because \tan \frac{\theta}{2} \neq 0 \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

と表すことができ, さらに, H_r は

$$H_r : W_r = 3 : 4 \quad \Rightarrow \quad H_r = \frac{3}{4}W_r \quad (2.6)$$

となる． よって Eq. 2.4, Eq. 2.5, Eq. 2.6より W_r は

$$\begin{aligned} W_r &= W_{req} - \frac{\frac{3}{4}W_r}{\tan \frac{\theta}{2}} \\ \Rightarrow W_r &= \frac{4 \tan \frac{\theta}{2}}{4 \tan \frac{\theta}{2} + 3} W_{req} \end{aligned} \quad (2.7)$$

となる． 以上より W_f が W_r より大きくなる時の W_{req} の条件は,

$$\begin{aligned} W_f &> W_r \\ \Rightarrow 3W_{req} \tan \theta &> 2h(4 \tan \theta + 3) \end{aligned}$$

であるから,

$$f(h, \theta) = \frac{2h(4 \tan \theta + 3)}{3 \tan \theta} \quad (2.8)$$

について調べればよい．ここで，体験者の身長を 1.7m とした時のグラフは Fig. 2.6 のようになる．例えば，プロジェクタの垂直投影画角を $\pi/6$ rad としたとき $f(1.70, 30.0) = 10.4$ である．したがって，設置幅が 10.4m よりも広く確保できるのであれば，背面投射よりも前面投射の方が有効範囲を広く確保でき，効率的にディスプレイを構築できると言える．またグラフより，プロジェクタに取り付けるレンズの投影画角が同一である場合，前面投射方式を採用する方が大型化において有利になることがわかる．このように， $f(h, \theta)$ を調べることで前面投射方式が有利となるスクリーン規模がわかる．

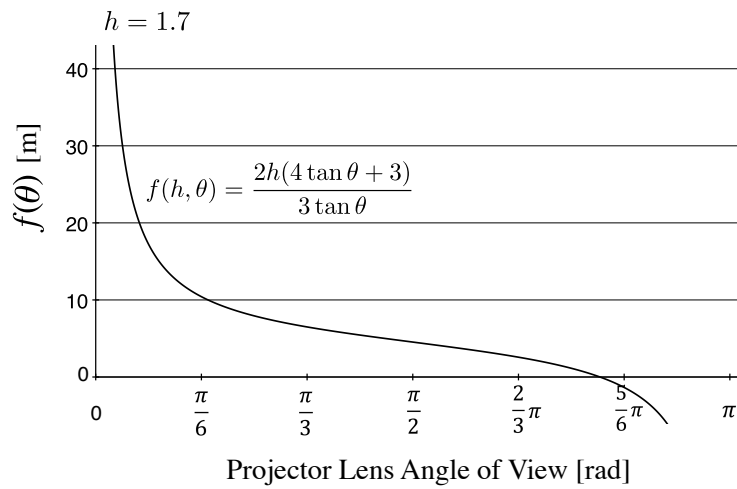


Fig. 2.6: Graph of boundary condition where effective width is same ($h = 1.7$)

2.2.4 スクリーン形状

システムを構築する室内の多くは直方体の空間であるため，体験空間を広く確保することを考えれば，スクリーンの基本形状も直方体に近い方がよい．CAVE やその派生システムはスクリーンが直方体を形作っており，これを部屋の大きさまで広げることができれば体験空間を広く確保できる．しかし多面体スクリーンを用いると，スクリーンの接合面が不連続である事から生じる輝度の差や，映像の極端な折れ曲がりが生じることが課題として挙げられる．そこで，CC Room や D-vision といった，直方体の角を曲面で接続する連続複合曲面型のスクリーンを採用することで，なめらかな映像の接続を実現しつつ体験空間を広く確保するスクリーン形状が提案されている．しかしこの 2 つは体験者の全周を覆うシステムとしては設計されていない [29, 30]．

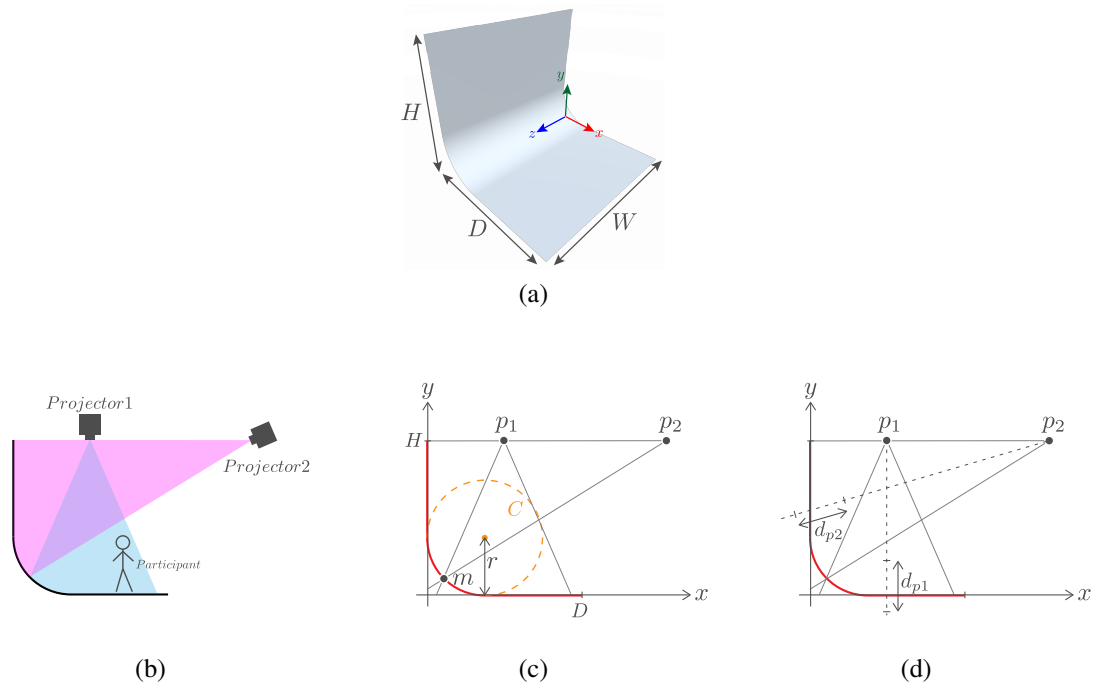


Fig. 2.7: Simple curved screen model

全周を覆う大規模なスクリーンの設計においても，建屋内に体験空間をより広く確保し，また極端な輝度差や映像折れのない映像提示を多人数に対し提示するために，直方体と曲面を組み合わせた連続複合曲面型を採用すべきである．曲面の曲率半径は大きいほど映像の折れ曲りが緩やかになるが，その分だけ歩行可能な床面積が減ることとなる．また，プロジェクタレンズのピントが完全に合う距離の前後の“ピントが合っているように見える範囲”すなわち被写界深度 (Depth of Field) によっても実現可能なスクリーンの曲率は変化する．これらの条件のトレードオフで，曲率を決定する．

例として Fig. 2.7bに示す前面投射型のシステムを複合曲面型スクリーンの基本形状として考える．システムは壁面と床面の2面のスクリーンが直交する形で接合され，その接合部分に半径 r のフィレットが施されている． y 軸を鉛直上方向として Fig. 2.7aのように直交座標系をとり，スクリーンの高さを H ，奥行きを D ，幅を W で表す．2つのプロジェクタは装置天面に固定されているとし，両プロジェクタによって映し出される二つの映像は円弧の中央である点 m で接合している (Fig. 2.7c)．またこのプロジェクタの被写界深度はそれぞれ d_{p1} , d_{p2} とする (Fig. 2.7d)．この場合，スクリー

ン設置面積に対する床面積の割合 P_{floor} は, r , D を用いて次のように表される.

$$P_{floor} = 1 - \frac{r}{D} \quad (2.9)$$

ただし, スクリーン上に投影された映像がぼやけずに見える条件として, 投影対象とするスクリーン面が被写界深度 d_{p1} , d_{p2} の間に収まっている必要がある. この条件を, プロジェクタ 1, プロジェクタ 2 のそれぞれの場合について考える.

プロジェクタ 1 については, x 軸上のスクリーン面と点 m が d_{p1} 内に含まれる必要があることから, 次の条件が得られる (Fig. 2.8).

$$d_{p1} > \left(\sqrt{2} - 1 \right) \frac{r}{\sqrt{2}} \Leftrightarrow r < \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2} - 1} d_{p1} \quad (2.10)$$

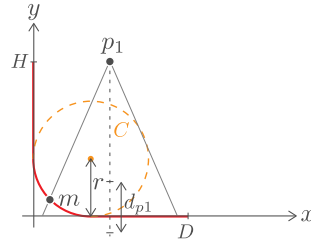


Fig. 2.8: DoF limitation of Projector1

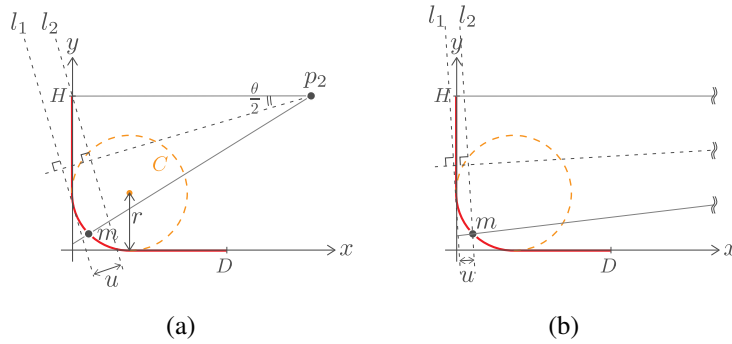


Fig. 2.9: DoF limitation of Projector2

プロジェクタ 2 の場合は, Fig. 2.9の u が投影対象とするスクリーン面の奥行きで

ある． l_1 , l_2 は投影中心線に垂直な直線であり， l_1 がプロジェクタから最も遠いスクリーン面， l_2 が最も近いスクリーン面に接している．プロジェクタ2の投影画角を θ とすると， l_1 は切片を b として

$$\begin{aligned} y &= -\tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}\right)x + b \\ \Rightarrow \quad \frac{1}{\tan\frac{\theta}{2}}x + y - b &= 0 \\ \Rightarrow \quad x + y \tan\frac{\theta}{2} - b \tan\frac{\theta}{2} &= 0 \end{aligned}$$

と表すことができる．ここで $k = \tan\frac{\theta}{2}$ とおいて，

$$x + ky - kb = 0 \quad \left(k = \tan\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.11)$$

とする．

l_1 は円 C に接していることから，中心点 (r, r) との距離は r である．したがって，

$$\begin{aligned} \frac{|r + kr - kb|}{\sqrt{1^2 + k^2}} &= r \\ \Rightarrow \quad r + kr - kb &= \pm r\sqrt{1 + k^2} \\ \Rightarrow \quad b &= \frac{r}{k}(1 + k \pm \sqrt{1 + k^2}) \end{aligned}$$

となる．

Fig. 2.9aより l_1 は傾き $-\frac{1}{k}$ をもつ円 C の接線のうち切片が小さい方であるから，

$$b = \frac{r}{k}(1 + k - \sqrt{1 + k^2}) \quad (2.12)$$

となる．

したがって Eq. 2.11と Eq. 2.12より l_1 は

$$l_1: \quad x + ky - r(1 + k - \sqrt{1 + k^2}) = 0 \quad \left(k = \tan \frac{\theta}{2}\right) \quad (2.13)$$

となる.

Fig. 2.9aの場合, l_1 , l_2 の距離 u は l_1 と点 $(0, H)$ との距離であるから,

$$\begin{aligned} u &= \frac{|0 + kH - r(1 + k - \sqrt{1 + k^2})|}{\sqrt{1 + k^2}} \\ \Rightarrow \quad u &= \frac{|kH - r(1 + k - \sqrt{1 + k^2})|}{\sqrt{1 + k^2}} \end{aligned} \quad (2.14)$$

であり, Fig. 2.9bの場合は l_1 と点 $m(r - \frac{r}{\sqrt{2}}, r - \frac{r}{\sqrt{2}})$ との距離であるから,

$$\begin{aligned} u &= \frac{\left| r - \frac{r}{\sqrt{2}} + \left(r - \frac{r}{\sqrt{2}} \right) k - r(1 + k - \sqrt{1 + k^2}) \right|}{\sqrt{1 + k^2}} \\ \Rightarrow \quad u &= \frac{\left| r \left\{ -\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}}k + \sqrt{1 + k^2} \right\} \right|}{\sqrt{1 + k^2}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

となる.

Eq. 2.14, Eq. 2.15より, プロジェクタ2の被写界深度 d_{p2} に投影対象スクリーン面が全て含まれる条件は,

$$\frac{|kH - r(1 + k - \sqrt{1 + k^2})|}{\sqrt{1 + k^2}} < d_{p2} \quad \wedge \quad \frac{\left| r \left\{ -\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}}k + \sqrt{1 + k^2} \right\} \right|}{\sqrt{1 + k^2}} < d_{p2} \quad (2.16)$$

$$\left(k = \tan \frac{\theta}{2}\right)$$

以上より, Fig. 2.7のシステムにおいては, プロジェクタ被写界深度からくる曲率半径 r の条件式 Eq. 2.10, Eq. 2.16の中で, 実装しようとするアプリケーションからくる床面広さの要請を満たす P_{floor} を Eq. 2.9によって探索することで曲率半径 r を決定できる.

スクリーン形状の設計

- 広い体験空間の確保と、極端な輝度差や映像折れ防止を両立するために、直方体と曲面を組み合わせた連続複合曲面型を採用する
- スクリーンを接合する曲面の曲率は、実装するアプリケーションに必要な床面積が確保でき且つプロジェクタの被写界深度の内に収まることを条件に、できるだけ大きく取る。

2.2.5 視点位置のトラッキング

大規模没入ディスプレイにおいて運動視差立体視を実現するためには、スクリーン内部での体験者の視点位置、姿勢をリアルタイムに計測し、バーチャル空間中の視点位置に反映する必要がある。物体の位置と姿勢を計測する主な方式として、慣性計測式、磁気式、光学式があるが、大規模没入ディスプレイでの頭部の位置姿勢計測においては、数十m規模の計測範囲を持ち、数mm程度の変位を、映像生成に十分な速度で計測できる必要がある。各方式の特徴をTable 2.1にまとめる。それぞれにおいて特に優れる項目を○、苦手とする項目を△で示している。なお空欄は、他の手法と同程度ということを示す。

慣性計測式は、理論上は計測範囲に制限がなく小型で高速な計測が可能な装置も存在するが、加速度や角加速度を積分処理していくという原理上、誤差が蓄積され長時間安定して使用することができない。特に、ジャンプや着地などの瞬発的な動きによってその誤差が大きくなるため、体験者の動き方に一定の制約を設ける必要がある。

磁気式は適切にキャリブレーションされた範囲内であれば絶対位置を高速高分解能

Table 2.1: Methods of position and orientation measurement, and their features

	Measurement methods		
	Optical	Inertial	Magnetic
Initial calibration	△		△
Movement restriction	○	△	
Resolution			○
Range		○	
Stability		△	

で計測できるが、計測領域付近に金属や磁場を発生させる機械などが存在すると磁束が歪み計測精度が大きく低下する問題がある。したがって、同時に使用可能な実験器具等に制約がある。

光学式は、上記二つと比べると計測対象が複数台のカメラから見えている必要があり、隠れに弱い。しかし、視点位置の計測にあたっては、プロジェクタと同様スクリーン上端から可能な限り下向きにカメラを設置することで隠れを最小化できる。近年ではカメラや計算機の性能の向上から数十 m もの計測範囲を構築可能になっており、適切にキャリブレーションすることで計測誤差も 1mm 以下に抑えることができる。光学式の中でも再帰性反射マーカを用いるパッシブ型においては、計測対象に取り付けるマーカが慣性計測式、磁気式と比較して軽量であるため体験者の装着負荷が小さく、歩く、走るといった動作を妨げにくい。

以上より、大規模空間で動き回る体験者の頭部位置の計測には、光学式のシステムを用いるのが最適であると言える。

大規模没入ディスプレイにおける視点位置トラッキング

- 計測範囲、速度、精度ともに十分であり、マーカ装着負荷が小さく体験者の動作を比較的妨げにくい、光学式システムを用いるのがよい

第3章 バーチャル環境構築 ソフトウェア

本章では、まず没入ディスプレイを利用したコンテンツを構築する上で必要になるソフトウェアの機能について議論し、本研究での着目点について述べる。その後、本論文で提案する新奇な立体全周視覚情報の生成アルゴリズムについて解説する。このアルゴリズムは任意形状のスクリーンを持つ没入ディスプレイに対応可能であり、体験者はスクリーン内部の任意の位置において正しいバーチャル環境を観察することができる。これはすなわち、体験者が装置内部を自由に移動可能であることを意味する。

3.1 視覚提示に必要なソフトウェアの枠組み

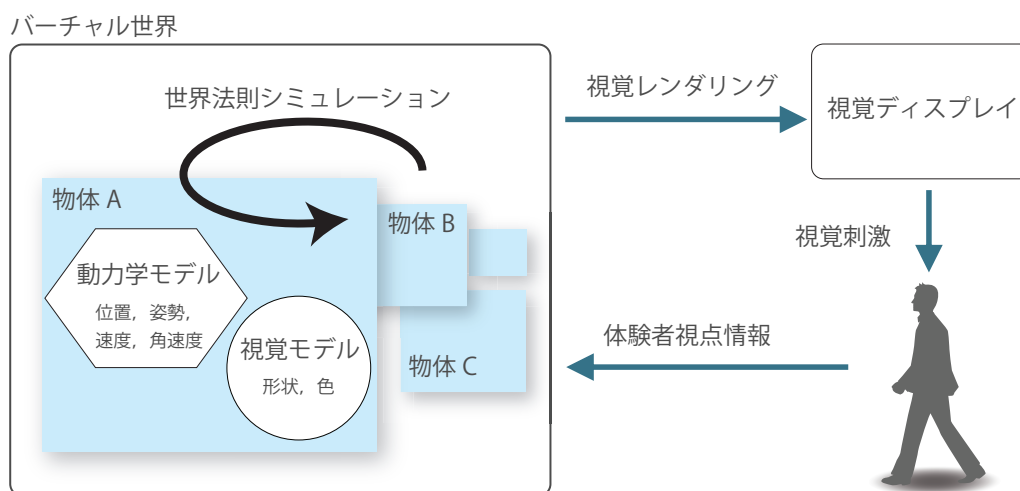


Fig. 3.1: Configuration diagram of virtual reality system generating visual stimulus

一般に、視覚刺激を生成するバーチャルリアリティシステムの構成（フレームワーク）は、Fig. 3.1のように表すことができる。バーチャルな世界ではその世界に存在する物体がその世界の法則によって相互作用しながら存在していると考えることができ、ここに体験者の視点情報を入力することで、このバーチャル世界の見えを、視覚ディスプレイを通して体験することができる。したがって、視覚提示に必要な物体モデル、すなわち物体の動力学モデル・視覚モデルを作成し、その物体の相互作用を規定する世界法則モデルを記述することで、視覚提示可能なバーチャル世界を自身の手で構成できる。これを“モデリング”と呼ぶ。モデリングされた物体の相互作用を、世界法則モデルに従って進めていく処理は、“シミュレーション”と呼ばれる。また、シミュレートされたバーチャル世界の様子を視覚ディスプレイ上で再生できる形に変換して体験者に提示する処理を、“レンダリング”と呼ぶ。プロジェクション方式をとる没入ディスプレイを用いた視覚提示システムにおけるレンダリングとは、バーチャル世界における体験者の位置姿勢を反映したバーチャル空間内での視界を、体験者の周囲を囲んだスクリーンに描画していくことを指す。

没入ディスプレイを利用したVRシステムにおいて、レンダリングの手順についてはハードウェアに依存し特殊なものとなるが、モデリングとシミュレーションについては既存の手法を用いることができる。したがって、本研究ではレンダリング手法について着目し、議論する。次節では、没入ディスプレイへのレンダリングアルゴリズムを解説する。

従来没入ディスプレイを用いたバーチャルリアリティシステムのソフトウェア開発環境の多くは、CAVEのような平面スクリーンへの映像投影を前提としてきた。特に、水平方向180度を超える立体映像レンダリングが可能なライブラリにおいて曲面スクリーンを定義可能なものは少なく、先に挙げたOmegalibにおいても曲面スクリーンの定義は容易ではない。今回提案する手法を実装することによって、曲面を含む任意形状のスクリーンにおいて任意の視点位置で歪みのない映像を提示することと、一定の制約のもと全周にわたって立体映像を提示することが同時に、そして比較的容易に実現可能となる。

3.2 立体視可能な全周視覚情報の生成アルゴリズム

3.2.1 アルゴリズム概要

提案するレンダリングアルゴリズムは、没入ディスプレイを構成するハードウェアと、アプリケーション間の抽象化層として機能するものである。アプリケーション開発者からの要求としては、従来のいわゆる描画処理ループの中に本レンダリングアルゴリズムが隠蔽された状態で組み込まれており、フラットディスプレイ上に描画する手順でCG空間を定義可能にすることが重要である。一方で、没入ディスプレイそれ自体の開発者にとっては、没入ディスプレイのハードウェアの定義を行うだけで、アプリケーション開発者に抽象化されたAPI（Application Programming Interface）を提供できるような仕組みが必要である。

本研究ではレンダリングを“全周立体映像生成”と“投影歪み補正”の2段階に分けて捉える。そして、アルゴリズムに対する設定情報として、“スクリーンのサーフェスモデル”、“プロジェクタパラメータ”、“体験者の視点位置”を入力する。このハードウェア情報と体験者情報を設定することで各没入ディスプレイへの表示に対応できる。アプリケーション開発者は用意したバーチャル環境を、事前に設定されたレンダリング処理に通すだけで、体験者から見たバーチャル空間の正しい見えを生成可能となる（Fig. 3.2）。

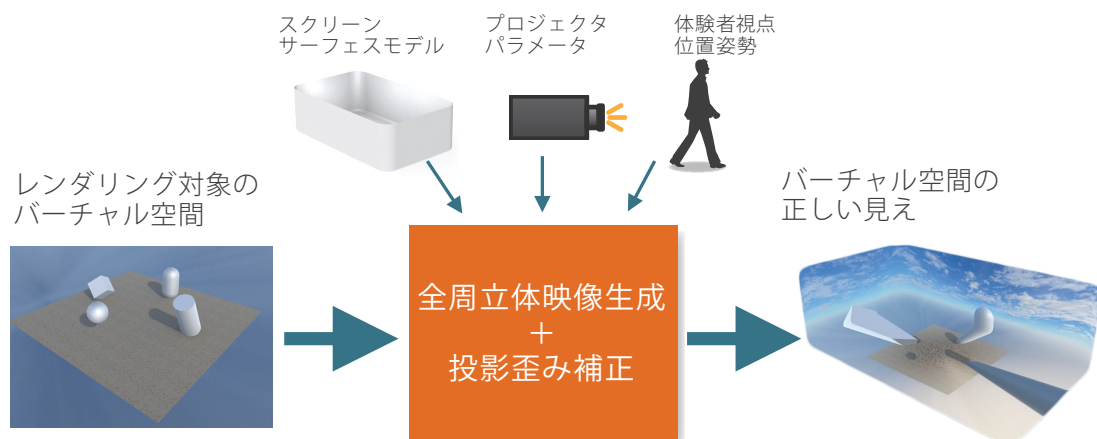


Fig. 3.2: Conceptual processing flow of rendering

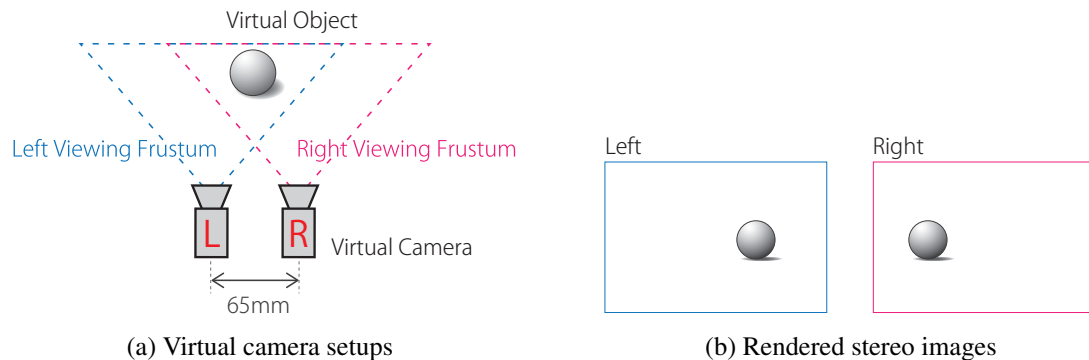


Fig. 3.3: Standard method for rendering stereo images

3.2.2 立体画像生成の基本原則と課題

コンピュータグラフィックス技術による両眼立体視可能な画像の生成は、基本的には視点位置をずらして2度レンダリングすることで実現される。まずバーチャル空間内に、Fig. 3.3aの様に成人の一般的な瞳孔間距離である65mmだけ離れた、隣同士においたカメラを想定する。そしてこの右目用、左目用のカメラそれぞれからの見えが、スクリーン上に表示される右目用画像・左目用画像としてレンダリングされる(Fig. 3.3b)。これが、標準的な立体視の実現方法である。

ところで、没入ディスプレイは比較的容易に複数名での空間共有ができるという特徴がある。また、バーチャル空間を共有しながらの対面コミュニケーションも円滑に実施できるという特徴もある。これらの利点を維持するため、ステレオレンダリングにおいても、システム内の複数の体験者に対して立体視を実現する手法をとるべきである。標準的な立体視の方法における課題として、位置と姿勢をトラッキングしている体験者がスクリーンとは反対の方向を向いた際に、右目と左目の位置関係が反転することが挙げられる(Fig. 3.4)。体験者が一人であれば、トラッキングされているその体験者はスクリーンを見ていないことになるため、右目用と左目用の映像が反転していても問題はない。しかし、他の体験者が観察する場合、そのスクリーン上の映像は立体視することが不可能になる。これを解決する全周立体画像生成手法を次に示す。

3.2.3 水平方向全周化の手法と制約

一般に、全天球全方向について同時に立体視可能な映像を生成、提示する事は不可能である。従って、視差付全周画像を作成するためには一定の制約を設け、それに

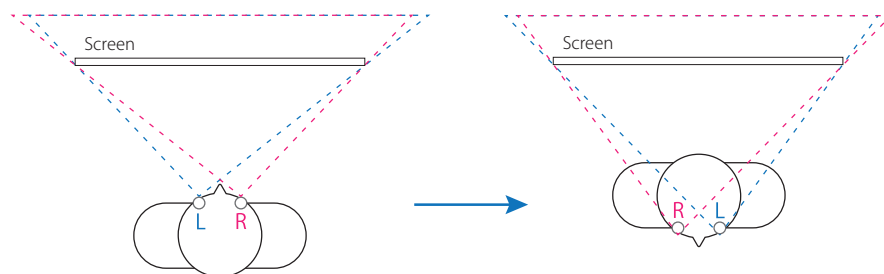


Fig. 3.4: Eye reversal problem when the user looks the opposite way from a screen

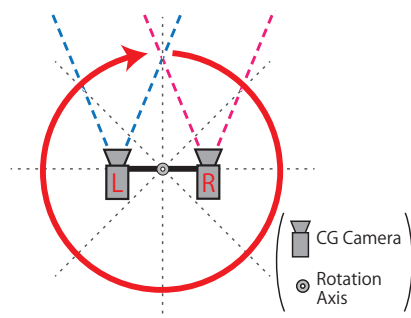


Fig. 3.5: Virtual stereo cameras for rendering stereo-panoramic images

よって一定範囲の同時立体視を可能にするという方法をとる．この全周画像生成には，中川らの視体積分割法を用いる [31]．

まず，Fig. 3.5に示すように，光軸の平行を保ちながら水平面上に並べた 2 台のバーチャルなカメラを想定し，これをバーチャルステレオカメラと呼ぶこととする．この 2 台のカメラのレンズ中心距離を 65mm とし，2 つのカメラの中央の位置を全周映像を生成するためのカメラの回転中心とする．このバーチャルステレオカメラをパン回転

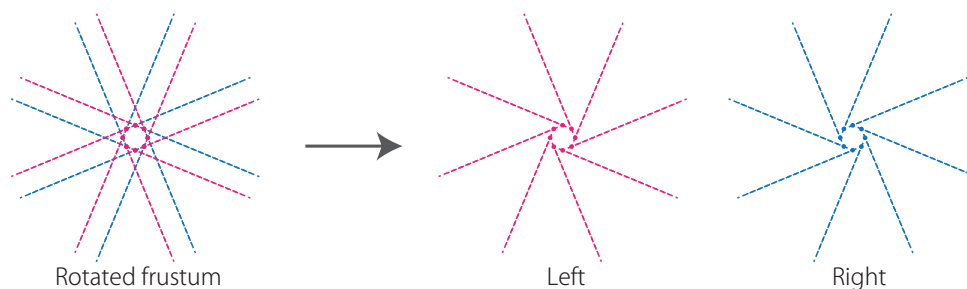


Fig. 3.6: Rotated view frustum on rendering stereo-panoramic image

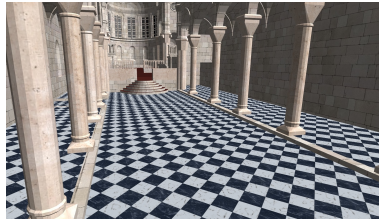


Fig. 3.7: Sample virtual environment: "The Cathedral of St. James in Sibenik"

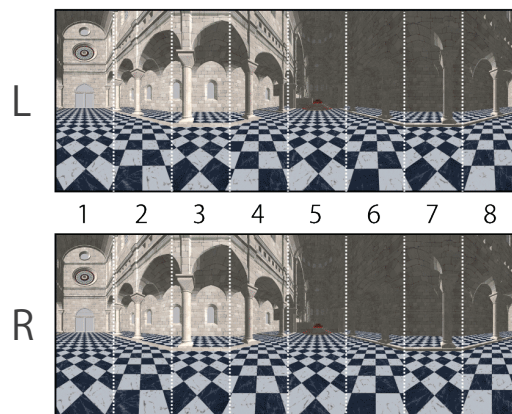


Fig. 3.8: Stereo-rendered images of sample virtual environment

させながら各経度方向を撮影した画像は、水平方向に 65mm の視差をもつ。この時一度にレンダリングする視体積の仰角および俯角は共に 60 度とし、水平画角は 45 度とした。定義した視体積を 8 回、カメラ回転中心周りに 45 度ずつ水平方向に回しながらレンダリングする (Fig. 3.6)。この操作で得る全周画像には水平 360 度、垂直 120 度の範囲が撮影されていることとなる。レンダリングのサンプルとして用いたバーチャル環境と、提案手法によるレンダリング画像をそれぞれ Fig. 3.7 と Fig. 3.8 に示す。サンプルに使用したのは、シベニクの聖ヤコブ大聖堂の CG モデルである [32]。

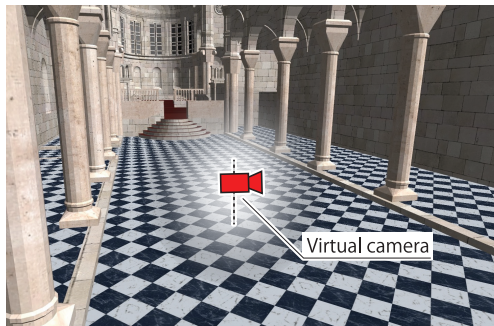
この時、モーションキャプチャによって取得した特定の体験者の頭部姿勢に応じてバーチャルカメラの姿勢および撮影時の回転方向を変えることで、ロール回転にも対応可能である。しかしこの方法では、トラックされていない体験者に対し適切な視差映像を提示できない。従って、トラッキングされている体験者は頭部を水平に保っていると仮定し、ロール方向の回転については実際の回転量を反映しないこととした。以上により、水平方向 360 度について、頭がロール回転しないという制約を設けた場合の立体視を実現している。

3.2.4 スクリーン形状による投影映像の歪みとその補正

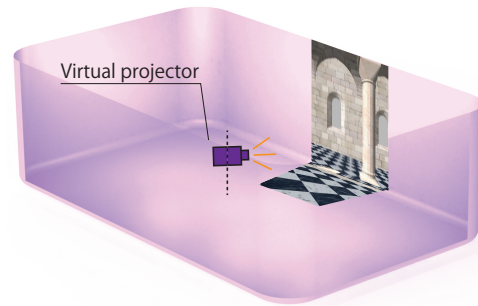
一般に、平坦でないスクリーンに対しプロジェクタで映像を投影すると、像は歪む。提案手法では、装置内の任意の一点から見た際に、曲面を含むスクリーン上に、バーチャル空間の見えを歪み無く再現する。このために、Fuchs らの射影テクスチャリングによる非平面投影映像の歪み補正の手法 [33] を立体視対応に拡張し、曲面を含む全周ディスプレイスクリーン上での歪み補正に応用する。本手法では Fuchs らの手法とは異なり、スクリーン形状をリアルタイムに計測することはせず、形状を再現したサーフェスモデルに対して、第 3.2.3 節の手法で生成したステレオ全周画像を、トラッキングした体験者の視点位置から射影テクスチャリングする。

処理の流れを Fig. 3.9 に示す。歪み補正処理の前段階で、バーチャルステレオカメラがバーチャル環境を撮像する (Fig. 3.9a)。その後、歪み補正処理ではまず、モーションキャプチャによって取得した体験者視点をスクリーンサーフェスモデルの内部に配置する。次に、この視点を中心として、第 3.2.3 節におけるバーチャルステレオカメラに対応する 8 つの視体積を考える。すなわち、水平方向視野角 45 度 (360 度/8)、垂直視野角 120 度の視体積である。そして、この視体積の射影変換の逆変換を投影行列として持つバーチャルプロジェクタを、バーチャルステレオカメラに対応する位置におく (Fig. 3.9b)。バーチャルプロジェクタから投影された像はスクリーンサーフェスモデルに映し出され、投影点 (体験者視点位置) から見て歪みの無い正しい見えを再現する。このテクスチャが貼り込まれたスクリーンモデルを、実際に投影するプロジェクタに対応する位置に配置したバーチャルなカメラで撮影する事で、各プロジェクタから投影すべき画像を得る (Fig. 3.9c)。最後に、得られた画像を実際にスクリーンに投影すると、体験者から見れば正しいバーチャル空間の見えがスクリーン上に映し出される (Fig. 3.9d)。

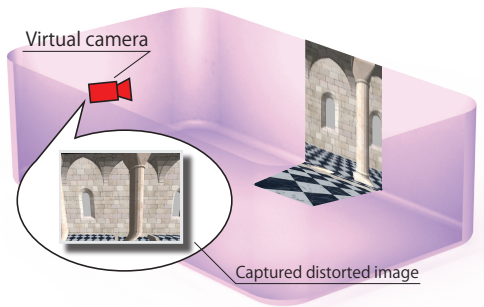
以上により、トラッキングされている体験者は水平方向全周にわたって正しい見えを得る。本手法を実行するために事前に必要となるのは、実際に投影する際に使うプロジェクタの内部・外部パラメータと、スクリーンのサーフェスモデルのみであることに注意されたい。従来の歪み補正で必要とされていたスクリーンの法線情報やワープによる映像歪みの設定が不要である分、事前準備が簡略化されていると言える。



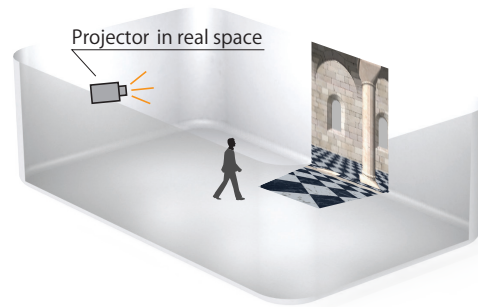
(a) The virtual camera rendered virtual environment before distortion correction phase



(b) Mapping the texture from the virtual projector, having the projection transformation matrix corresponding to the left-eye or right-eye camera to the virtual screen surface model, using the projective texture technique.



(c) Capturing the textured screen model to the left and right rendering buffer from the position of the actual projector.



(d) Projecting the rendered image from the actual projector

Fig. 3.9: Distortion correction method for panoramic and stereoscopic projection

3.2.5 床面と天面に対する立体画像生成と歪み補正

提案する全周立体視の実装，歪み補正の手法では，トラッキングされている体験者の仰俯角 60 度以上の方向，つまり体験者の足元および天頂方向の画像が欠ける事となる．これを補うために，全周ステレオレンダリング実行の際に横方向全周画像に加えて，真下および真上方向のステレオ画像を生成する．これは，両眼に対応する 2 つのバーチャルカメラを，トラッキングされている体験者の視点位置および姿勢に合わせて配置しレンダリングすることで得る．

また曲面スクリーンへの投影による歪みの補正は水平方向の歪み補正と同様に，得られた画像をテクスチャとして，このバーチャルカメラの射影変換の逆変換を設定し

たバーチャルプロジェクタからスクリーンサーフェスモデルに投影することで実現可能である。ただしこの手法で補った足元および天面方向の映像に関しては、トラッキングされた体験者から見た場合のみ、正しい立体感が得られるものとなる。

第4章 LargeSpace実装

ここまでで示したハードウェア，ソフトウェアの指針について，その有効性を確認するため，実際に大規模没入ディスプレイ LargeSpace を構築した．

4.1 投影系ハードウェアの実装

4.1.1 サイズおよび投影方式の検討

LargeSpace を構築する建屋は，幅 25 m 奥行 25 m 高さ 8 m の無柱空間を持つが，そのうちの幅 25 m 奥行 10 m は他の設備のために確保されている．したがって残りの 25 m × 15 m を本装置に用いる．これは，バレーボールやドッジボールの公式コートが確保できるような広さであり，人が内部で動き回るには十分である．ここで，第 2.2.3 節にて示した Eq. 2.8 について， $f(1.7, \theta) = 15$ とすると， $\theta \approx 18.0[\text{deg}]$ となる．この角度よりも投影画角が大きくなるプロジェクタレンズが存在すれば，前面投影方式を採用する方が体験空間を広く取ることができる．今回の投影系では十分な画角のレンズが用意可能であるため，前面投影方式とした．

4.1.2 スクリーンの構築

前面投射方式での実装では，光を透過しない素材を使用して全周をなめらかにつなぐスクリーンを構築する必要がある．プロジェクタの投影光の導入と，施工後の機能追加を容易にするために，本装置では天面はスクリーンを設けず開放することとした．このとき体験者に提示する映像に欠損が生じるが本装置においては拡張性を優先した実装とした．形状は，壁面と床面のスクリーン接合面での映像の極端な折れを防ぐため，スクリーンの構成面として平面の他に，トーラス面，円柱面を採用し，連続した形状になるよう設計した (Fig. 4.1)．

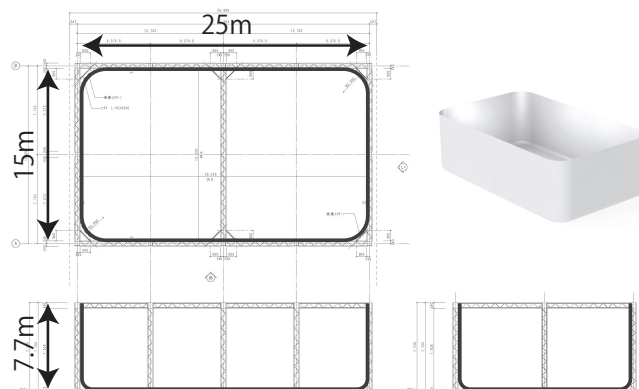


Fig. 4.1: The screen dimensions of LargeSpace

スクリーンを支える骨組みは、同時にプロジェクタなど重量のある装置を搭載可能にし、またスクリーン内部を柱のない空間にできるものが望ましい。従って十分な強度のある屋内イベント会場構築用のスチールトラスを骨組みとして使用した。

スクリーンは、3種類の素材で構成されている。最も大きな面積を占める壁面には、遮光幕の生地である LONDAY 8074 センシアを使用した。幅 1.4m、高さ 7.2m の生地を 41 枚縫合し壁面全体の 3/4 を覆い、残りの 1/4 は、スライドファスナによって開閉可能な出入口部分を含む 13 枚を縫合して覆った。この二つの生地の手端部分は面ファスナになっており、互いに接続されることで一枚のスクリーンとなる。壁面スクリーンの上端はスチールトラスに固定された直径 22mm の鋼管で支持し、下端は木材の曲面スクリーンと面ファスナによって接続することで、張力をかけている。また壁面スクリーンの外側には、防球ネットに使用される素材であるターポリンを張り補強を行った。次に、床面と壁面を接続する曲面スクリーンであるが、これは木材で作成し、表面をスクリーン用塗料で塗装した。最後に、床面スクリーンの素材には体育館用の白色タイルを使用した。これにより、重量のある実験器具の使用や運動を伴う実験等を可能とした (Fig. 4.2)。

4.1.3 プロジェクタ配置と立体視の実現

第 2.2 節で、視覚ディスプレイに必要な機能として、両眼視差立体視を挙げた。これの LargeSpace での実現方法について述べる。

映画館でよく用いられる両眼視差立体視の実現方法に偏光眼鏡方式があるが、欠点として、1つの投影範囲に対し2台のプロジェクタが必要となること、および頭部を



Fig. 4.2: Screen inter view (Photo by Katsuaki Sato)

ロール回転した際に右目、左目用映像のクロストークが起きることが挙げられる。他方、1台のプロジェクタで実現可能であり、なおかつ頭部姿勢に影響されない立体視の実現方法として、アクティブシャッター眼鏡方式（アクティブ式）がある。こちらは、右目と左目用の映像を毎フレーム切り替えつつ交互に再生し、体験者のかける眼鏡の液晶シャッターを左右交互に高速開閉することで、左右の目に入る映像を切り替え、両眼視差立体視を実現する。システム利用中の体験者の頭部姿勢は不確定であるため、本装置ではアクティブ式を採用した。

複数のプロジェクタを使用した投影系でアクティブ式の立体視を実現する場合、全プロジェクタが同時に左右目用映像の切り替えを行う必要が有るため、プロジェクタ間のフレーム同期が必要となる。このため本装置ではプロジェクタに Christie Digital Systems 社の Mirage シリーズを採用した（Mirage DS+14K-M）。本プロジェクタは同期信号の入力端子を備え、全台を一つの同期信号生成器と繋ぐ事で、120Hz で同期された映像投影を行う事ができる。また同時にこの 120Hz の信号は赤外線エミッタによって液晶シャッター眼鏡（XPAND 3D Glasses Lite IR: X105-IR-X1）へと伝えられ、シャッタータイミングの同期が実現される。なお、各プロジェクタは 1400×1050 ピクセルの解像度を持つ。

プロジェクタ配置においては、Mirage シリーズに使用できるレンズを用いたとき、どのようなプロジェクタ配置で壁と床を画素でうめるかということが解くべき問題となる。

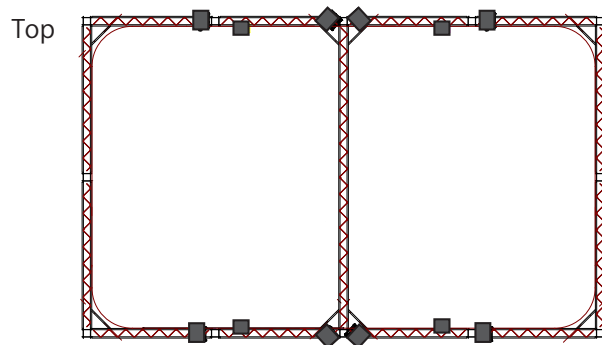


Fig. 4.3: Projector placement on the steel truss frame

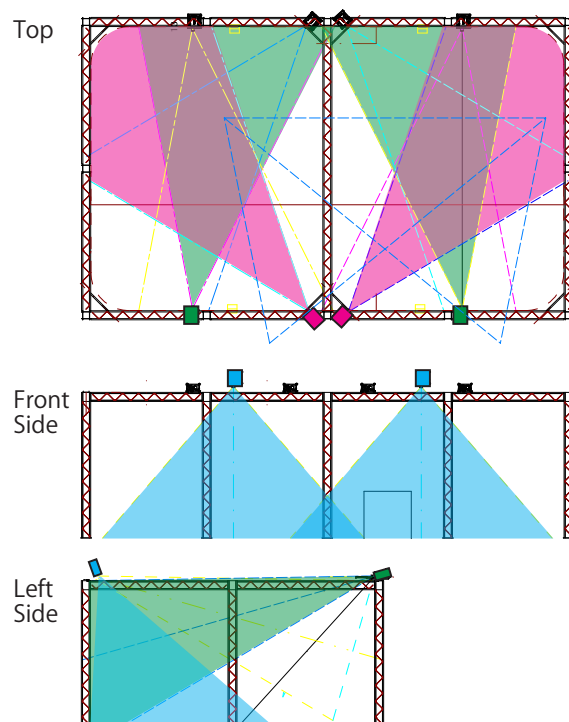


Fig. 4.4: Projection range of the projectors

プロジェクタ全12台は全てスクリーンを支えるトラス上に、Fig. 4.3のように配置した。この時の投影範囲を Fig. 4.4に示す。採用したプロジェクタの画面縦横比は4:3で

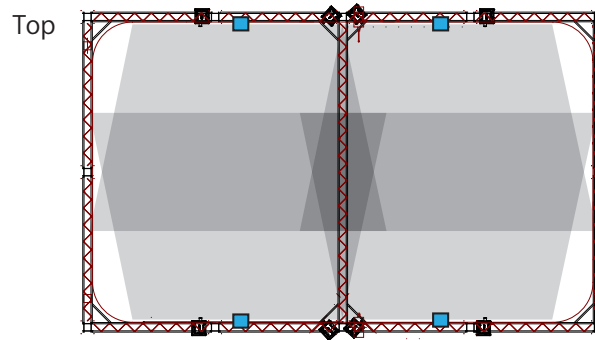


Fig. 4.5: Projection range on the floor screen

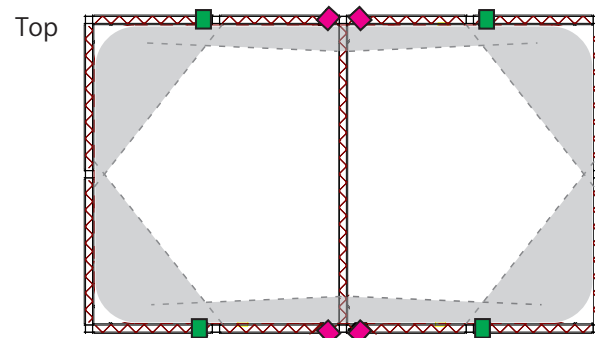


Fig. 4.6: Surplus projection range of the projector projecting on the wall

ある．これを2画面横に並べることによって8:3の縦横比となる．ここで，LargeSpaceの壁面スクリーンは高さ7.70mであることから，8:3の映像を高さ7.70mの壁面に投影すれば，映像の幅は20.5mとなる．しかし，長手側の壁面幅は25.0mであるため投影範囲の不足が生じる．一方短手側の壁面スクリーンの幅は15mであるが，これも同様に2画面を横並びに投影する．これにより，映像が短手側の壁面幅より余分に投影されるため，長手側の不足分を補うことができる．またこのとき映像は床面にも余分に投影される．

床面への投影には，Mirageシリーズに使用可能な最も焦点の短いレンズ（投写比率0.73:1）を使用し，4つの台形で埋めている．この際，床面投影プロジェクタのみでは投影範囲の不足がある（Fig. 4.5）．この不足は壁面投影プロジェクタの余剰分（Fig. 4.6）によってうまく補われる．

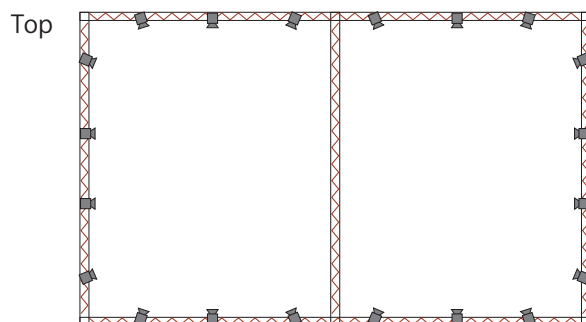


Fig. 4.7: Placement of the cameras for motion capture on the steel truss frame

4.1.4 モーションキャプチャシステム

本装置では、モーションキャプチャシステムとして、OptiTrack 社の Prime41 カメラを使用した。Prime41 は自発光型の赤外線カメラで、トラス上に設置された全 20 台 (Fig. 4.7) が制御用のワークステーションと Ethernet インタフェースによって接続される。スクリーン内の全ての位置について、2 つ以上のカメラで撮影できる配置とした。また姿勢は、体験者頭部に装着したマークがなるべく隠れなく見えるよう、できる限り鉛直下方向を向けている。カメラから得られるデータは、制御ソフトウェアの Motive により処理され、LargeSpace 映像生成プログラムにストリーミングされる。カメラの撮像速度は 120fps で位置推定処理による遅延は 2ms 以下である。Motive は、再帰性反射素材の球体マークを複数組み合わせ、その形状を剛体マークとして登録する事で、剛体の位置姿勢をリアルタイムに推定できる。本システムでは、剛体マークを立体視用の眼鏡に取り付けることで体験者の視点の位置姿勢を計測する。剛体マーク上の再帰性反射球の配置は回転によって同一にならないよう注意し、なおかつ隠れの発生も考慮して、Fig. 4.8 に示す形状とした。

4.1.5 映像生成クラスタ計算機

映像生成クラスタ計算機では、モーションキャプチャから得た体験者の視点情報を基にスクリーン形状を考慮した歪み補正を行い、プロジェクタから投影すべき立体映像を生成する。

映像の生成は、1 台のマスタ計算機と 2 台のスレーブ計算機、およびトラッキングシステム制御計算機によって行われる。スレーブ計算機には、OpenGL を用いたプロ

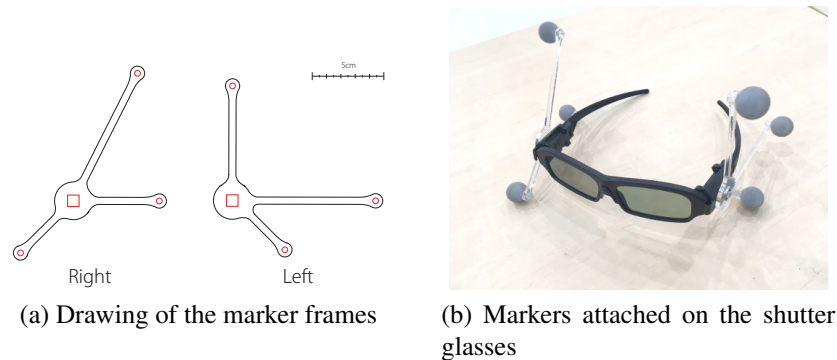


Fig. 4.8: Retroreflective markers for tracking the user's viewpoint

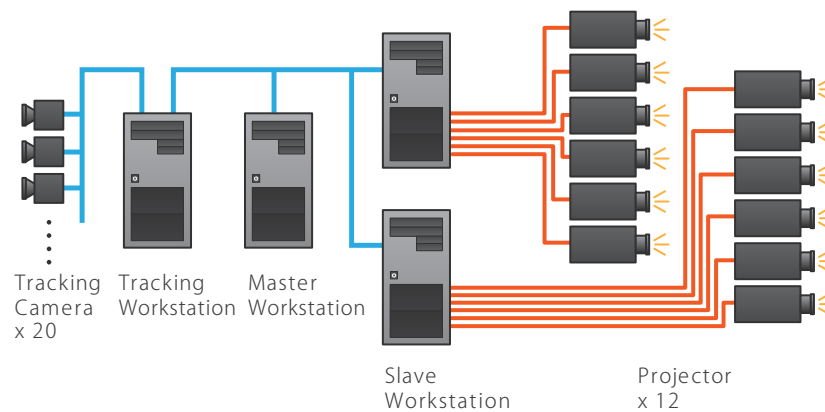


Fig. 4.9: Connection schematic of projection system of the LargeSpace

グラムで生成する立体映像を出力可能なグラフィックボード（GPU: ELSA NVIDIA Quadro P6000）を、それぞれ4枚ずつ挿入可能である。システム全体としては、最大で8枚のグラフィックボードが運用できる拡張性をもたせた設計となっている。現状では12台のプロジェクタへの映像出力を行っている。それぞれの計算機は10GbpsのEthernetインタフェースで接続されており体験者の位置などの必要な情報を共有する。また生成された映像は、光インタフェースを経由したDVI接続によってプロジェクタに送られる。フレーム切り替えの同期信号はマスタに挿入されたGPUで生成され、送信される。この信号によって、各スレーブのGPU、プロジェクタ、シャッター眼鏡のタイミング同期を行う。システム全体の接続概略図をFig. 4.9に示す。

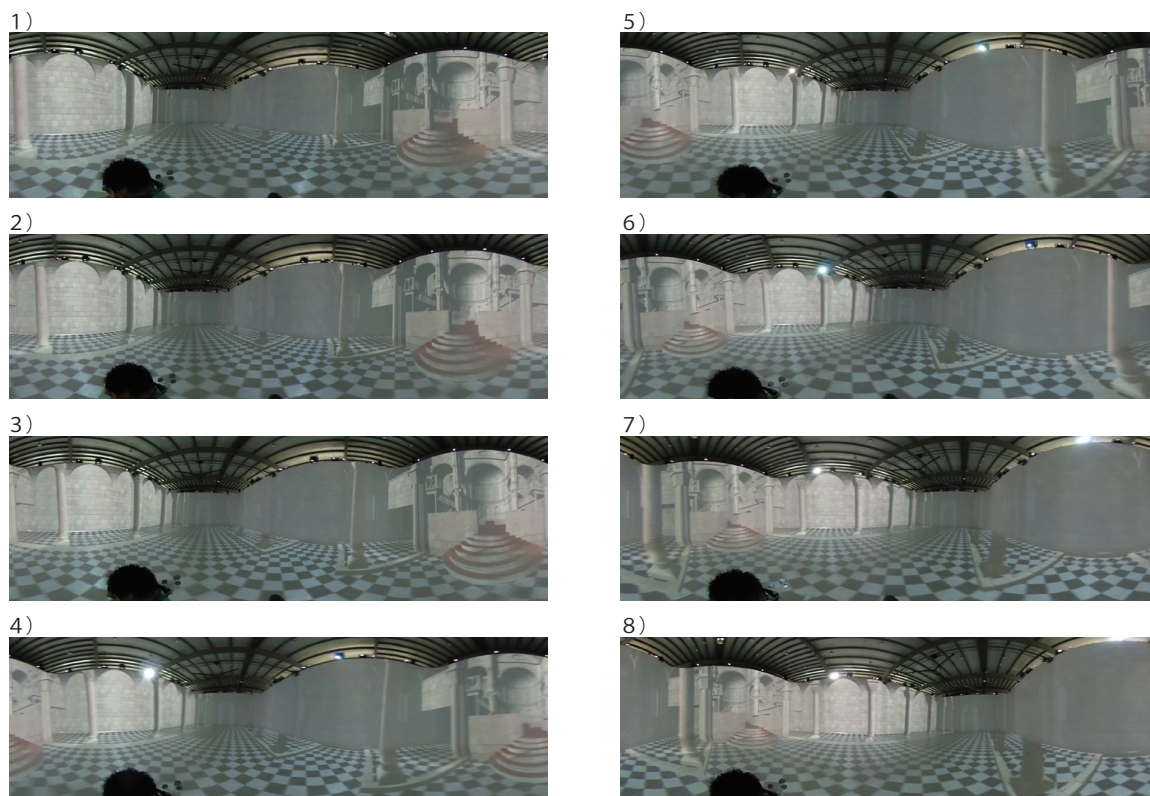


Fig. 4.10: Rendered virtual world inter view

4.2 バーチャル環境構築ソフトウェアの実装

4.2.1 投影歪み補正検証プロトタイプ

まず、提案するアルゴリズムによって正しい見えを生成できるか検証するため、OpenGL とシェーダ言語を用いたプロトタイプを作成した。バーチャル環境をレンダリングし LargeSpace 内部を歩行した際に、体験者視点においた 360 度カメラ (RICHO Theta V) で動画を撮影した。これを連続画像として Fig. 4.10 に示す。これより体験者の移動に合わせてスクリーン上の映像が変化していることがわかる。また柱を見ればわかるように、体験者の視点からは歪みなくバーチャル環境を観察できることもわかる。この結果から、アルゴリズムは正しい見えを生成できていると言える。

4.2.2 ゲームエンジンを利用したモデリングとシミュレーション環境

第 3.1 節で、視覚刺激を生成するバーチャルリアリティシステムの構成において述べた際、モデリングとシミュレーションは既存の手法を用いることができた。今回このモデリングとシミュレーションの部分は、3D ゲームを製作する時に利用される、いわゆるゲームエンジンと呼ばれる統合開発環境を活用する。ゲームエンジンを用いることで、バーチャル物体の配置や動きの設定、ライティングの設計などバーチャル環境のモデリングが、プレビュー画面を確認しながらグラフィカルな操作方法で構築できる。また落下や衝突といった物理シミュレーションを含む世界のシミュレーションも標準で定義されており、コンピュータグラフィックスに関するプログラム知識などを持ち合わせずとも、ある程度のバーチャル環境を構築可能である。

いくつかあるゲームエンジンのうち、本システムでは Unity を利用する [34]。Unity は、多くの市販ゲームの開発で実際に使用されているのみならず、Future Lab. の DeepSpace のような大規模没入ディスプレイでも利用された実績がある [35]。非営利目的では無償で使用可能であり、ソフトウェアパッケージはインターネット上で配布されている。したがって、Unity 上でレンダリングアルゴリズムを実装することによって、全世界の潜在的なユーザが没入ディスプレイを設計・利用可能になる。

4.2.3 Unity 上でのレンダリングアルゴリズムの実装

実装したプログラムのうち、レンダリングに関するコード群のクラス図を簡略化したものを Fig. 4.11 に示す。アプリケーション実行開始時に発生する初期化イベントにおける各クラスの動作は次の通りである。

まず Observer は Camera オブジェクトのコレクションを Observer オブジェクトの子として生成する。その Camera オブジェクトそれぞれには個別のレンダリングバッファが割り当てられ、第 3.2.3 節で述べた全周を見回す位置姿勢に配置される。それぞれの Camera オブジェクトは割り当てられたバッファにバーチャル空間を毎フレーム描画する役割を持つ。これにより全周の視差つき画像が得られる。次に、DistortedDrawer はスクリーンのサーフェスモデルを実体化する。そして、Observer の持つ Camera オブジェクトと同位置同姿勢でバーチャルなプロジェクタを生成する。それぞれのプロジェクタは対応する Camera オブジェクトのレンダリングバッファをテクスチャとして共有し、スクリーンサーフェスモデルに毎フレーム射影する役割を持つ。最後に、DistortedDrawer は LargeSpace のトラス上に設置された本物のプロジェクタに対応し

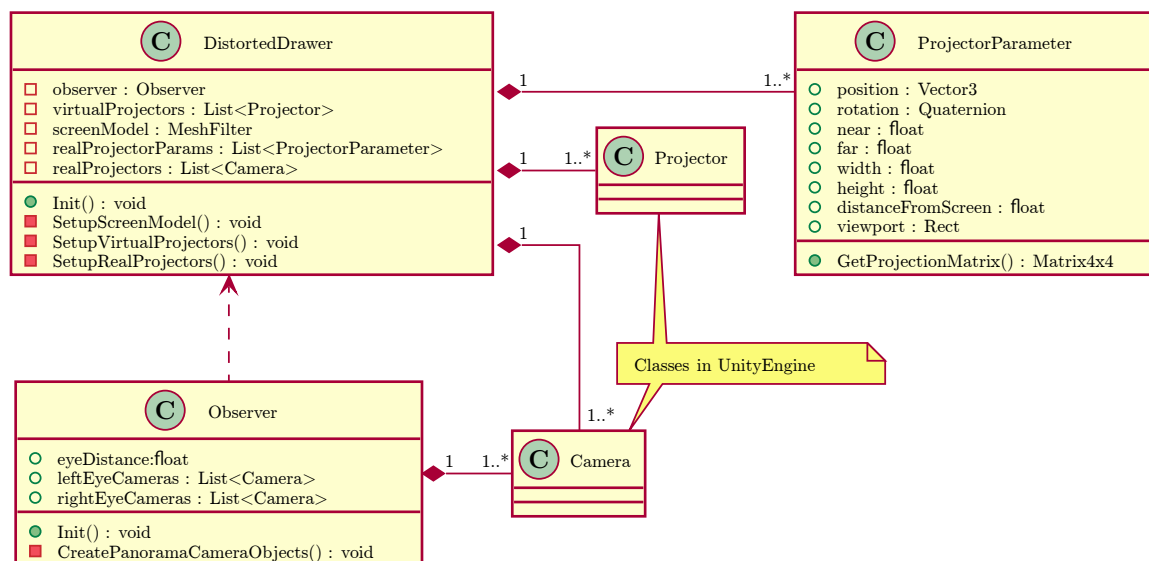


Fig. 4.11: Class diagram of LargeSpace rendering functions on Unity

た位置姿勢，レンズパラメータを持つ Camera オブジェクトを生成する．描画ループの中でこの Camera オブジェクトのレンダリング結果が画面上に表示され，プロジェクタから投影されることとなる．

レンダリングアルゴリズムのアプリケーションへの組み込み

Unity において，アプリケーション開発者は Prefab と呼ばれる雛形オブジェクトをシーン内に含めるだけで様々な機能追加を行うことができる．同様の導入容易性を実現するために，LargeSpace のレンダリング処理も Prefab 化を行なった．これにより，たとえばゲーム用として作成されたバーチャル空間についても，Prefab ファイルのドラッグ&ドロップなどコード記述を必要としない比較的容易な操作で LargeSpace 内での表示に対応可能である．具体的な手順は付録 A に記す．

実際に描画される様子を確認するため，ゲーム用に用意されたバーチャル環境の例としてプリミティブ立体を配置したシーンを UnityEditor 上で用意した (Fig. 4.12)．UnityEditor は，Unity が備えるゲーム開発用のメイン UI である．またシーンとは，描画する CG オブジェクトやその動作を規定するスクリプトなどによって構成されるバーチャル環境のことである．．用意したシーンに対し LargeSpace でのレンダリングに必要な Prefab を手順にしたがって追加し実行した様子を Fig. 4.13 に示す．Unity で

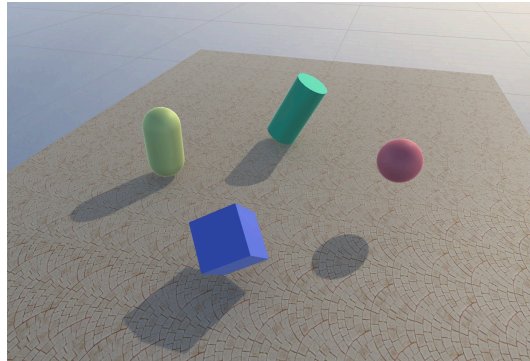


Fig. 4.12: Virtual environment to visualize

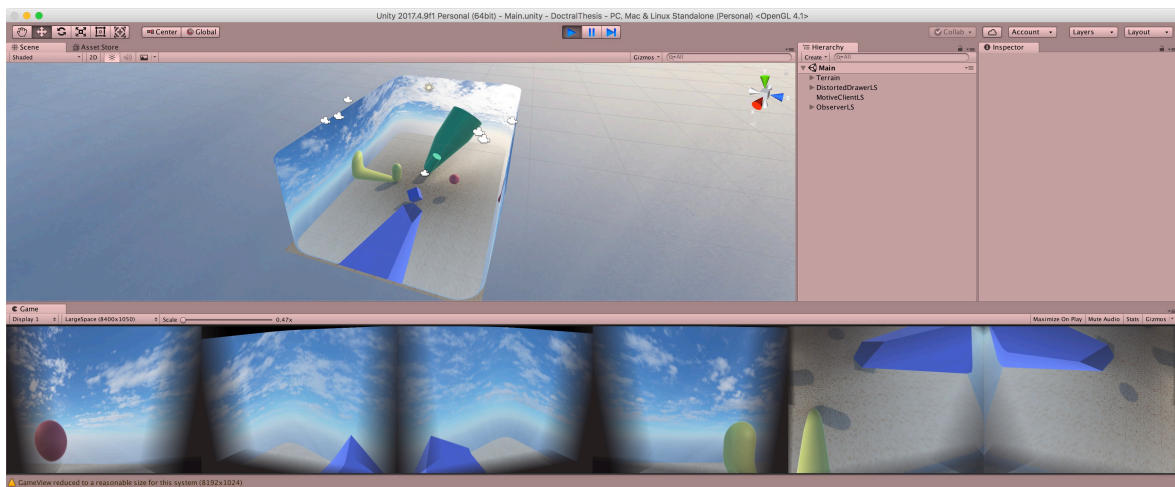


Fig. 4.13: LargeSpace rendering algorithm executed on UnityEditor

は、構築したバーチャル環境はすぐさまデバッグ用にコンパイルされ、Play ボタンによって Game タブ上で実行の様子を確認できる。図はプログラム実行時に LargeSpace のスクリーンサーフェスモデルが実体化され、ゲーム画面にスクリーンサーフェスモデル上での変形が適切に行われたレンダリング結果が表示されている様子を示している。これを単独アプリケーションとしてコンパイルし LargeSpace の計算機上で実行することで歪み補正および立体視が実現されていることを確認した。スクリーン内で観察した際の様子を Fig. 4.14 に示す。体験者視点からの正しい見えが再生されていることがわかる。これにより、Unity によって構築されたバーチャル環境が簡単な操作で LargeSpace に対応できることが示された。



Fig. 4.14: View of the rendered virtual world composed by Unity

LargeSpace 以外の没入ディスプレイへの適用

この実装は，LargeSpace のみならず他のプロジェクション方式没入ディスプレイにも適用できる．没入ディスプレイ開発者はスクリーンサーフェスモデルをスクリーン設計時の CAD データなどから出力し Unity に取り込み，LargeSpace のスクリーンサーフェスモデルと差し替えたのち，プロジェクタパラメータを実物に沿って設定することによって，アプリケーション開発者に提供できる雛形プロジェクトを作ることができる．このスクリーンのサーフェスモデルを利用した曲面定義を実現したことで，Omegalib 等の従来のバーチャル環境構築ソフトウェアで複合曲面スクリーンを定義する際に必要だった，面のワープ変形などの煩雑な作業を省略可能になった．

第5章 LargeSpaceの評価と考察

構築した大規模没入ディスプレイについて、その性能を評価した。

5.1 有効画素数と有効視野角

本装置の有効画素数は約 1425 万画素であった。有効画素数とは、スクリーン上に投影される画素のうち、プロジェクタの光が重なり合う領域で重複した画素を除いたものである。プロジェクタの投影する総画素数に対して、約 2 割がブレンディング領域として使用されている。

視野角は、スクリーン中央の高さ 1.6m の位置に視点を仮定し、最大の視野角となる方向を向いた時の垂直、水平視野角を算出した。このとき、水平方向は全周、垂直方向は足元から 129 度の高さまで映像で覆われることとなる (Fig. 5.1)。運動視差と両眼視差を表現可能な、水平方向全周を覆う没入ディスプレイとして、本システムは 2019 年 1 月時点で世界最大である。垂直方向視野角は全立体角を覆うものではないが、これは LargeSpace に高い拡張性を持たせるために天面を開放したためであり、また歩行時は地面方向に注意が向くことや、CAVE と同等の視野角を有していることから必要十分であると考ええる。

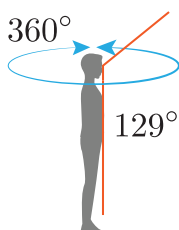


Fig. 5.1: Field of view that can be covered when standing in the center of LargeSpace

Table 5.1: Calculated resolution of LargeSpace

Size of target screen [m]($H \times V$)	Field of view [degree]($H \times V$)	Resolution [pixel]($H \times V$)	Angular Resolution	Visual Acuity Conversion
7.1×21	109×46.7	$(2.79 \times 10^3) \times (9.45 \times 10^2)$	2'20"	0.428

5.2 角分解能

視覚ディスプレイの評価指標の一つとして、角分解能がある。これは、ある距離からスクリーンを見た際に表示されている物体が区別できる最小の角距離を示したものであり、隣り合う画素の中心間距離を元に算出できる。例えばスクリーンが高精細で表示される画素が小さければ、区別できる最小の角距離が小さくなるため、角分解能が優れていると言える。

LargeSpace では、プロジェクタ投影光がスクリーンに対して垂直に当たっていないためにスクリーン上の位置によって画素の大きさが異なっている。したがって、画素の中心間距離が一定にならず、そのままでは角分解能が算出できない。そこで、角分解能の算出対象を長手側スクリーン (接続曲面を含まない) としてその実質的な解像度を求めてから、スクリーン中央に立った際の水平方向における平均角分解能を求めた。実質的な解像度は、スクリーン上に画素が均等に並んでいると仮定して、次の 2 式から求める。

$$N_{total} = N_w N_h \quad (5.1)$$

$$\frac{N_w}{N_h} = \frac{W}{H} \quad (5.2)$$

ここで、 N_{total} は対象スクリーン上に表示されている総画素数、また N_w 、 N_h は求めたい実質的な水平、垂直方向画素数とし、 W 、 H はスクリーンの縦横の大きさを示す。総画素数は対象スクリーンを埋める画素数を画面上で数え上げた値を使用した。複数のプロジェクタ投影光が重なる領域についてはプログラム上でマーキングすることで、重複して数えないよう注意した。この数え上げの結果は約 264 万画素であった。視点位置は対象スクリーンから 7.5m 離れた高さ 1.6m の位置とした。

以上の条件より計算した結果を Table 5.1 に示す。水平方向の平均角分解能は 2 分 20 秒角、視力換算値で 0.428 となった。日本の普通自動車転免許取得における合格基

準は片目 0.3 以上, 両眼 0.7 以上であるため, この計算値から LargeSpace が人間の生活に必要なある程度の精細さをもった視界を提供できていると考えられる. 例えば, 体験者の目の前 35cm の位置に A4 用紙を掲げた場合, LargeSpace では計算上その A4 用紙を 100ppi (pixel per inch) 程度の解像度で表示することができる. これは 22 インチのフル HD(縦 1080 画素, 横 1920 画素) 液晶モニタと同等の画素密度であることから, 少なくとも 12pt 程度の文字サイズであれば読むことができると言える.

5.3 体験空間容積率

第 2.1 節では, 大規模な没入ディスプレイを構築する上では, 建屋内の空間を有効に使う必要があると述べた. そこで, 空間の利用効率について比較を行った. LargeSpace と, 代表的な没入ディスプレイである CAVE および, 全周ディスプレイではないものの 10m を超えるスクリーンを持つ DeepSpace について, 装置全体容積, スクリーン内部の容積 (体験空間容積), スクリーン容積が装置全体に占める割合 (体験空間容積率) を算出したものを Table 5.2 に示す. ここにおけるスクリーンの容積とは, スクリーンによって囲まれる領域の体積とする. また装置の体積とは, スクリーン, 投影に必要なプロジェクタ, および投影距離を確保するための空間を含む領域を囲む最小の直方体の体積とする.

CAVE の体験空間容積率は 10 パーセントを切った. これは, 投射方式が背面投射型の装置であるため必要なバックヤードサイズが大きくなったためである. DeepSpace においては, 体験空間容積率は 65% であり比較的高いと言えるが, 一方で LargeSpace は水平方向の全周投影を実現した上でさらに高い容積率を達成している. LargeSpace は従来の全周ディスプレイと比較し, 設置空間に占める体験空間容積が大きく, 空間を有効に使用できている事が分かる.

スクリーンの容積は, 同時に体験できる人数, 体験者が動き回ることのできる範囲

Table 5.2: Screen volume ratio of immersive display systems

	Volume[m ³]		Screen volume ratio[%]
	Whole system	Screen area	
LargeSpace	3.6×10^3	2.8×10^3	78
CAVE	2.5×10^2	2.2×10	8.8
DeepSpace	2.0×10^3	1.3×10^3	65

に直接影響する。また、大きければ大きいほど全周ディスプレイの特徴のひとつである多人数同時体験の利益も大きくなる。従来の CAVE 型ディスプレイでは、体験空間容積を大きくするにつれ必要となるバックヤードも大きくなり、先の容積比は変化しない。一方で今回提案した設計法を採用すれば、スクリーンの大型化とともに容積比の向上が見込まれる。従って本設計手法は、全周ディスプレイの更なる大型化において非常に有効であると言える。

5.4 前面投射方式における投影光遮蔽の問題

第 2.2 節で述べた通り、前面投射方式では体験者が投影光と干渉し壁面映像に影が落ちる場合がある。そこで、身長 1.70m の体験者が LargeSpace 内を歩き回ることを想定し、どの程度の歩行範囲であれば壁面に投影される映像が体験者の頭部で遮られることがないか検証した。

検証手順

まず高さ 1.70m としたカメラ用三脚に、位置検出用のマーカを取り付けたものを用意する。これを擬似体験者とし、スクリーン中央から Fig. 5.2 に示す 8 方向に向かって移動させていく。そして、壁面に投影される映像が擬似体験者によってすこしでも遮られる位置に到達した時、その直前のマーカの位置を記録する。

結果と考察

結果を Table 5.3 と Fig. 5.3 に示す。図の破線で囲まれた領域を歩行可能範囲とすることで、最小でも 7.7m×16.1m の長方形の範囲で遮蔽のない壁面映像での体験が可能

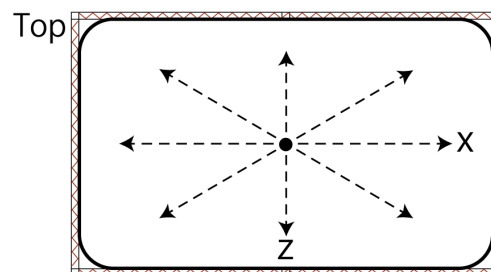


Fig. 5.2: 8 directions for testing walkable area

Table 5.3: Measurement result of the walkable area

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
$\mathbf{X}[m]$	0.0	-8.1	-9.2	-8.0	0.0	8.1	9.2	8.1
$\mathbf{Z}[m]$	3.9	4.5	0.0	-4.5	-3.8	-4.4	0.0	4.6

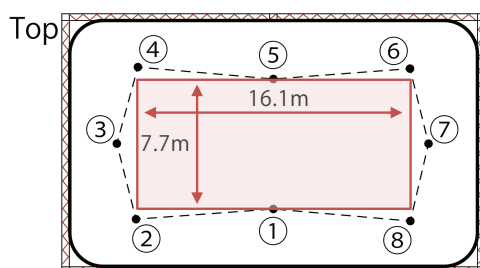


Fig. 5.3: Maximum walkable area without projection occluding by the participant

であることがわかった。ここで、遮蔽は壁面に近づくにつれ映像の下方よりはじまるが、ある壁面まで近づいた際に発生する遮蔽は、体験者が見ることのできる全周映像のうちのごく限られた範囲である。アプリケーションにもよるが、様々な方向に歩くようなウォークスルーを実現するものの場合、体験者は常に環境を見回しており、360度のうちのごく一部におちる影が与える影響は小さいと考える。従って、上記の歩行可能範囲は最小限のものであると考えることができ、アプリケーションの種類によっては、さらに拡大する可能性があると言える。またもし仮に遮蔽を完全に無くす必要がある場合は、LargeSpaceの装置拡張性を活かす形でプロジェクタを追加し冗長に配置することで複数方向からの投影が可能になりこの問題は解決できる。

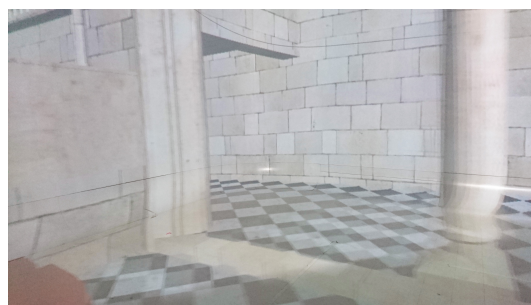
5.5 複合曲面スクリーンによる輝度変化軽減効果

複合曲面スクリーンの接合部に映像を投影することで、輝度差軽減の効果を確認した。Fig. 5.4に、2種類のコンテンツを表示した際の接合部の様子を示す。これは、床と2枚の壁面が接合されている四隅のうちのひとつを撮影したものであるが、どちらも鋭い輝度変化は見られない。従来の平面スクリーン同士の接合と比較すると、緩やかな変化に抑えられていると言える。ただし、それぞれの画像中心付近に輝度の高い点が見られる。これは木材に塗装をのせることでスクリーンとして使用している部分

だが、その塗料表面が一部光沢面となり、鏡面反射が発生しているためであると考えられる。この結果より、スクリーンを構築する際は、より拡散成分の強い塗料を使用する必要があるといえる。



(a)



(b)

Fig. 5.4: Luminance gradation at the corner of the screen

第6章 大規模没入ディスプレイの応用

6.1 大規模没入ディスプレイにおける移動感覚提示

6.1.1 バーチャル環境内での移動感覚提示に関する従来研究

全周ディスプレイの代表的な利用方法の一つに、広いバーチャル空間を提示し内部を自由に移動する、ウォークスルー型のアプリケーションが挙げられる。従来のCAVE型の全周スクリーンでは、体験者の移動を、ゲーム用コントローラ等を使用した入力によるバーチャル空間内の視点移動で表現してきた。一方、移動という動作の現実感の向上のためには、前庭感覚情報、体性感覚情報の提示が必要である事が指摘されている [36]。移動時に伴う加速度および角加速度の刺激は内耳にある耳石器および三半規管で主に受容される事が知られているが、人間の頭部のみに加速度等を与える事は不可能である事から、この感覚器官への刺激は、体験者の身体全体を動かす事で実現する必要がある。また体性感覚に関しても、その受容器が全身に分布しているため、同様に身体全体を動かすことが必要である。このために用いられる装置はモーションベースまたは前庭感覚ディスプレイと呼ばれ、バーチャルリアリティ分野でも従来より研究されており、フライトシミュレータなどとして実用化されている [37,38]。これらの多くは、乗り物を模して座席が用意されており、体験者はそこに体を固定される。この場合、体験者は乗り物によって加速度が与えられていると感じることとなる。これでは身体を自由に動かせず、例えば生身の体で空を飛んでいるような感覚は提示できない。また、上方向に浮かび上がるような感覚を生起させたい場合でも足は地面に着いたままであるため、浮遊感が得られにくい。

6.1.2 ワイヤード駆動モーションベースとの統合

LargeSpaceを用いたウォークスルーアプリケーションではその広い空間を生かし、実際の歩行によってバーチャル空間を移動する事ができる。この移動方法では、周囲

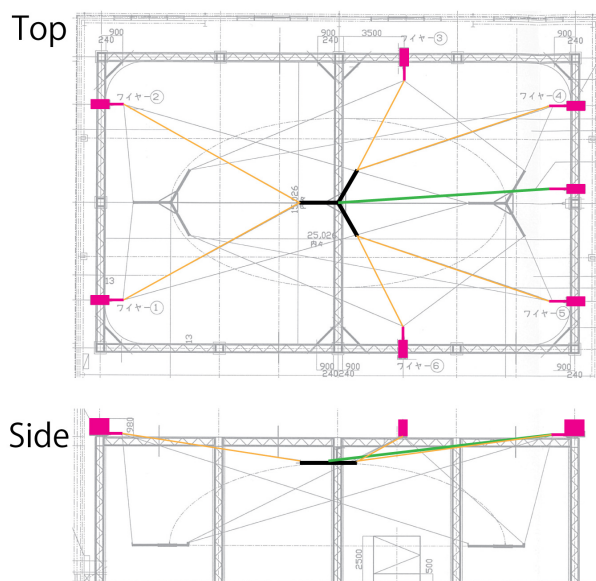


Fig. 6.1: Construction of Wire-Driven Motionbase

の見える変化と前庭感覚，歩行動作による体性感覚が一致するため高い現実感が得られるが，移動空間が地表平面に限定され高さ方向の広い空間を活かすことができない．従来の全周ディスプレイでは，バーチャル空間中の視点が空を飛ぶような場合も，当然ながら体験者の足は地面に着いた状態であった．しかし，前述の通り身体が宙に浮いている状態であれば，本来両足は地面からの抗力を感じない．LargeSpaceはスクリーン空間の高さが7.7mあり，実際に体験者を高く引っ張り上げるのに必要な空間を確保できる．バーチャル空間中の視点が宙に浮いた時，同時に体験者の身体が浮かび上がる体験を実現する事で，これまでになく浮遊感，飛行感の提示が可能になると考え，スチュワートプラットフォーム [39] 状の懸垂型前庭覚提示装置を構想した．LargeSpaceはそのスクリーンを支えるトラス柱上に実験装置を配置することで機能の拡張が可能であるため，そこにワイヤ巻き取り装置を搭載し，ワイヤ駆動型のモーションベースとした．

Fig. 6.1にモーションベースの概観を示す．本装置は，体験者が吊り下げられるY字のベース，そのベースに接続された6本の位置姿勢制御用ワイヤと1本の免荷用ワイヤ，そしてワイヤ駆動用モータ，およびモータ制御用ワークステーションから成る．本装置ではワイヤのたわまない範囲で，スチュワートプラットフォームと同様にベースの位置および姿勢の6自由度を制御可能である．体験者が飛行している際の様子を



Fig. 6.2: Conducting floating experiment with the motionbase

Fig. 6.2に示す．多くの前庭感覚提示装置の搭乗部が乗り物型であるのに対し，本装置では歩行リハビリテーションに用いられる免荷器具を体験者とベースの固定に使用する．これにより体験者は手足の自由を保ったまま空間内を自由に飛行できる．本装置を用いて，バーチャル空間内での移動に伴う加速度および角加速度を体験者に提示する事で，前庭覚刺激を伴うバーチャル空間内の移動が，実空間の移動範囲制限を超えて可能となる．

6.2 アプリケーション

大規模没入ディスプレイの有用性を理解するために，本節に示す3種類のコンテンツを開発した．

6.2.1 ウォークスルーアプリケーション

レンダリングアルゴリズムをUnityゲームエンジン上で実装したため，仕組み上はUnityEditorに取り込むことができるCGモデルであれば，LargeSpace上での表示に対応できる，そこで，没入ディスプレイの基本的なアプリケーションの一つであるウォークスルー体験を実装した場合の描画性能を確認するために，インターネット上で公開されているモデルを使用したバーチャル環境を構築し，歩いて見てまわることのできるアプリケーションを作成した．一般にCGモデルを構成する頂点数が増える

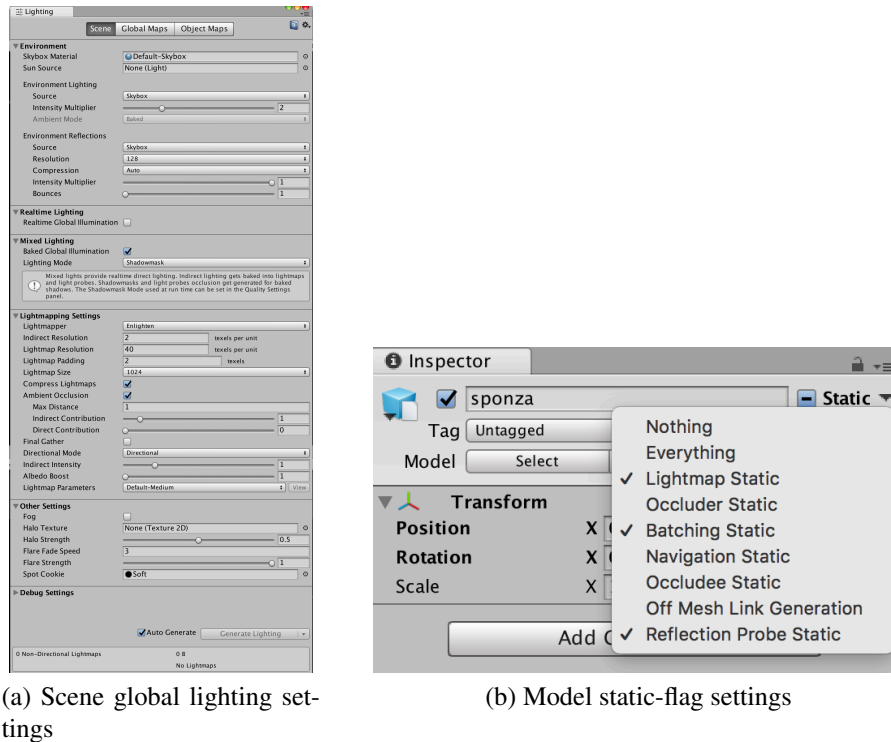


Fig. 6.3: Lighting settings of walkthrough application

と描画負荷も増加する．したがって，表示するモデルは三角ポリゴンの数が段階的に大きくなるよう選定し，DabrovicSponzaとCrytekSponza，およびBreakfastRoomを用いることとした [32]．比較対象として，モデルを何も表示しない（スカイボックスによる背景描画のみの）アプリケーションも用意した．アプリケーションの作成にあたり，モデルがUnity上で適切に表示されるようインポートの設定は適宜変更するが，それ以外のUnity上のライティング等の設定はFig. 6.3に示す設定に統一した．

それぞれのモデルの描画の様子をFig. 6.4に，また頂点数と実行時のfps（frames per second）をTable 6.1に示す．fpsは実行開始から20秒程度経過し描画が安定したのち

Table 6.1: Number of triangles, vertices and fps

	Empty	DabrovicSponza	CrytekSponza	BreakfastRoom
Number of Triangles	0	66,450	262,267	808,622
Number of Vertices	0	59,810	184,330	166,211
Average of fps	60.1	44.9	37.9	34.7



Fig. 6.4: CG models for measuring frame rate

の計測値 50 データの平均値とした。表より、6 万頂点程度で構成された CG 物体の提示ですでに fps が低下していることが確認できる。これは、全周立体画像レンダリング時に水平 8 方向を見回しながらステレオレンダリングすることによって、実質的に描画するポリゴン数が 16 倍となるためである。この問題を解決するためには、8 方向を見回す処理についてジオメトリシェーダによる頂点移動を駆使するなどして GPU 内部で処理が完結できるよう改良を加え、描画負荷を抑える必要がある。ただし、計測のために用いた CG モデルはゲーム等のリアルタイム描画用に最適化されたものではないという点については考慮すべきである。

6.2.2 心理学実験のためのバーチャル実験環境

第 1.1 節にて言及した通り、没入ディスプレイはその特徴として実寸大のスケール感覚が得やすいことが挙げられる。また没入ディスプレイは、計算機によって作り出された視覚刺激を、何度でも同じ条件で、なおかつ実験参加者に負荷が少ない状態で提示できる。これは被験者実験における環境変数（すなわち視覚的な状況変化）につ

いて任意にコントロールが可能であり、再現可能な状態で実験参加者に何度も提示できることを意味する。没入ディスプレイはこれらの特徴を持つことから、心理学分野への応用が期待されている [40]。そこで、今回設計指針を示した大規模な没入ディスプレイでバーチャルな実験環境を再生することによって、これまでのシステムでは実現できなかった、歩行などの大きな移動を伴った人間の行動・判断について分析する実験、あるいはより多くの実験参加者で体験を共有するような実験が実施できるのではないかと考えた。これについて検討するため、次の2つのバーチャル実験環境の実装を試みた。

道路横断実験用バーチャル実験環境

近年、道路空間の安全性を高めるための枠組みとして歩車混合の交通環境（Shared Space）が提案されている [41]。Shared Space では、自動車、自転車、歩行者などあらゆる交通モード間のコミュニケーション増加によって安全性が向上するとしているが、それを定量的に検証するための実験として、道路横断時の歩行者と自動車とのコミュニケーション（頷き、アイコンタクト）と協調行動（道の譲り合い）の観察実験が行われている。谷口らは条件に合う交差点を事前に調査し、そこで道を横断しようとする歩行者と通行しようとする車両があった場合にそのコミュニケーションの様子を観察するという手法をとっている [42]。この従来手法における問題点は、車両速度や歩行者の特性などが正確に把握されないまま記録されることである。

この問題を解決するために、バーチャルな都市環境の道路にバーチャルな車両を走行させ、実験参加者にその道を横断させることのできるバーチャル実験環境を用意した (Fig. 6.5)。本環境では、例えば接近してくる車の速度を 10km/h から 60km/h の間で設定し、それに対して歩行者が道路を横断しようとするか否かを、実験実施者は目視で観察しつつ、トラッキングした位置情報を時系列データとして記録できる。従来の実験のように実際の道路で観察する場合とは異なり、車の速度や道幅といった環境変数を任意に設定可能で再現度の高い環境が用意できていることに加え、実空間では事故になりかねないような状況での実験が安全に実施可能になったと言える。再現可能なバーチャル環境と実験参加者の頭部位置・姿勢の時系列データが揃うことから、CG 映像による体験者の視点映像の生成も可能となる。また従来の VR 技術を用いた同様の実験環境と比較すると、体験者は自身の身体をもってして実験環境内で走る、跳ぶなど、より活発な動きも行える環境となった。この自由度の向上により、体験者の突発的な回避動作なども含めより自然な応答を観察可能になったと言える。

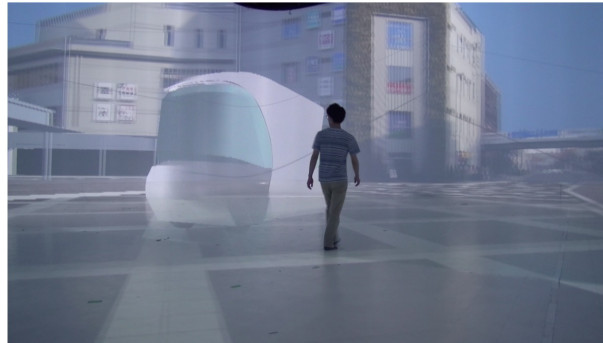


Fig. 6.5: Environment for experimental analysis of behavior. Virtual environment reproducing Tsukuba station with a virtual vehicle

高潮リスク提示実験用バーチャル実験環境

近年の震災や豪雨などの教訓から、災害時に迅速で的確な避難を可能にするための対策が求められている。関谷らは、被災者が適切な避難行動をとれるか否かには「自分の家、地域のリスクを知り、行動規範を醸成」できているかが大きく影響していると報告している [43]。したがって災害への備えとしては、定期的な避難訓練による避難行動の学習に加えて、災害発生時の状況を想像し災害が自分の身に起きることとして実感していることが重要である。これを支援する従来研究として、スマートフォンを用いた簡易 HMD 型の高潮シミュレータがあり、高潮災害のリスクを正しく把握させ平時における災害への危機意識の向上効果が確認されている [44]。

等身大の空間表現が可能な大規模没入ディスプレイによって上記の体験を試行するため、LargeSpace においても高潮シミュレータを実装した。Fig. 6.6に、UnityEditor 上での高潮の表現と、LargeSpace でのみえを示す。体験者は、徐々に上昇してくる泥水が自分自身の体と横浜中華街の街を飲み込んでいく様を体感できる。

本シミュレータは没入ディスプレイ上で実装されているため、簡易 HMD 型と比較してバーチャル空間を他者と共有しやすく、また互いの身体動作も見えるため、結果として体験中に参加者同士で直接議論を交わしやすくなっている。また実装した災害シミュレーション環境は、前述の道路横断実験環境のように実環境で再現するには危険度の高い状況が表現されていることから、避難などにおける行動分析実験にも有用であると考えられる。



(a) The appearance of yokohama-chinatown CG model on UnityEditor



(b) The model rendered with water effect



(c) View from the inside of LargeSpace's screen

Fig. 6.6: Yokohama Chinatown model and immersion simulation

6.2.3 没入型インスタレーション

没入ディスプレイの空間共有性，大規模システムならではの移動自由度の高さ，また VR システムとしてのインタラクティブ性を活かした没入型のアート作品制作の可能性を検討するため，次の 2 作品の制作，展示を行なった．

Flies in The Sky

概要 University of Art and Design in Linz Austria の Sommerer らと共同で制作にあたった Flies in the Sky の展示の様子を Fig. 6.7に示す．これはバーチャルなハエの群れが参加者の動きに反応して飛び去ったりまとわりついてきたりする体感型のアート作品である． Alfred Hitchcock の映画， The Birds（邦題：鳥）において，黒い鳥たちが突然人間に襲いかかる有名なシーンがあるが， Flies in The Sky はそのシーンから感じ



Fig. 6.7: Installation of Flies in The Sky

られるような不安と魅力に似た刺激を創造することを目指している [45].

インスタレーションの実装と実施 参加者は LargeSpace 内を飛び回るいくつかの巨大なハエの群集に近づくことでインタラクションを行う. 本展示のために開発したプログラムでは, 参加者とハエ群集との距離・方向に応じてハエの羽音が再生される方向と音量が変化する. また参加者が群集に近づく速度によって, ハエが逃げたり, 逆に顔にまわりついたりするインタラクションを体験できる.

フィードバック 参加者らの反応として, 顔の周りを飛び交うバーチャルなハエを手で払う様子や, 近づいてきたハエの群集から走って逃げる様子が観察された. また, ハエの群集が参加者自身の動きによって挙動を変えることに気づいた後の参加者の反応として, ハエ群集に向かって飛び込む, ジャンプする, しゃがむといった行動をし, 積極的にバーチャル物体とのコミュニケーションを試みる様子も観察された. 参加者の感想として「実際の蠅より大きく, 怖く, 不快に感じた」との意見も見られた.

Bird Song Diamond Project

概要 LargeSpace の全周映像提示機能, およびワイヤ駆動モーションベースを使用したインスタレーション作品の鑑賞会 “BIRD SONG DIAMOND Japan 2016～鳥の歌のきらめき～” (BSD) を開催した. 本イベントは University of California, Los Angeles (UCLA) の Vesna らによって 2012 年から始動した BSD Project の一環として催された



Fig. 6.8: Installation of Bird Song Diamond ～鳥の歌のきらめき～

ものである [46]。プロジェクトの最終目的は、鳥のさえずりの意味と構文を人間に理解させる事であるとされている。同氏はこれまでに、鳥の鳴き声を空間にマッピングし参加者の動きに応じて聞こえる音が、インタラクティブにまた自立的に変化するインスタレーション作品を制作するなど、科学と芸術を融合する活動を行ってきた。今回の鑑賞会では、本プロジェクトに以前から参画する東京大学の池上高志研究室と共同で、全周映像による鳥の群集飛行シミュレーションおよびシミュレーションに基づいた LargeSpace 内での音響マッピングを含むインスタレーションの制作、公演を行った。

インスタレーションの実装と実施 LargeSpace を使用した映像系システムでは、全周スクリーンを使用した動画の再生、および Boid 群集モデル [47] に基づくパーティクル運動のリアルタイム生成と可視化、さらにそのパーティクル群と参加者とのインタラクションを実現した。また、ワイヤ駆動モーションベースを使用し、演者が浮遊するパフォーマンスも組み込まれた。公演時の様子の一部を Fig. 6.8 に示す。インスタレーションは1時間毎に実施し、下記の内容で構成した。

- 1) スクリーン全面で、鳥の餌となる昆虫が蠢く動画を再生する。

- 2) 空を想起させる水色の背景に、ポリゴン調の、鳥の群集が飛行する。また参加者の位置に応じて、集散を行う。
- 3) 鳥の装飾を施した演者がモーションベースによって LargeSpace 上部にゆっくりと移動し静止する。演者は羽ばたく鳥の群の一部となる。
- 4) 全周スクリーン全面で、空撮映像を再生する。
- 5) 黒い背景の中を、バーチャルなクアッドコプターの群集が飛行する。また、実際に LargeSpace 内にクアッドコプターを飛行させ、バーチャルな群集をそれに追従させる。
- 6) クアッドコプターが場外に消え、上空の演者が降りてくる。着地と同時に演者の足元から空間が結晶化するエフェクトが広がり、全周が結晶化したのち白にフェードアウトする。

フィードバック 参加者からは、「鳥の群れとシンクロする感覚が素晴らしい」「空間を移動すると鳥の鳴き声が変わっておもしろかった」「(芸術学部の学生として) 何らかの作品に利用してみたい」といった肯定的な意見が多かった。一方で、「視聴覚以外の感覚にも刺激が有るとなると良い」「もっと映像とのインタラクションを増やすべき」などといった、不足に感じた部分への提案も散見された。作品の再生中は、配布したアクリル製の模擬羽を腕に装着した参加者が、その羽を羽ばたかせながら空間内を歩き回る様子が観察された。全体としては多くの参加者が映像と音によって作り出された空間に興味を示しており、またモーションベースによる浮遊のパフォーマンスも好評であった。

没入型インスタレーションの考察

Fly in The Sky では参加者がハエから逃げ、また BSD では参加者が羽を羽ばたかせながら歩き回る様子が観察されたが、これは参加者が大きくあるいは素早く動くことを可能とした LargeSpace のならではのインタラクションおよび参加者の反応であると言える。また Fly in The Sky において、作者が作品を体験することで生起させようとしていた“不安”を参加者が感じていたことがその発言から推察された。2つのインスタレーションのどちらにおいても参加者同士がバーチャル空間を眺めながら会話

をする様子が観察されたが、これはコミュニケーション阻害要因が少なかったりバーチャル空間の共有が容易であったりする没入ディスプレイの特徴が生かされた結果であると考える。以上より、芸術分野でも大規模没入ディスプレイは活用可能であり、他者と共有可能なバーチャル空間はアーティストの新たな表現方法となりうることが示唆されたと考える。

第7章 考察

7.1 提案手法の有効性

本研究ではまず，没入ディスプレイにおける実験器具や体験者の移動可能範囲の制限についてシステムの大型化によって解決することを目的として，大規模没入ディスプレイのハードウェアの設計指針を提案した．この提案に沿って実装された LargeSpace は，他の没入ディスプレイと比較して高い体験空間容積率を持ち，前面投射方式の弱みである投影光遮蔽を考慮してもなお 16.1m×7.7m の広い歩行可能範囲があることが確認された．複合曲面を採用したスクリーンは，壁面同士の接続部に関しては極端な輝度変化は見られず，平面スクリーンの接合部よりも自然なみえを実現したと言える．

これらの実装結果から，設計指針は妥当であり，大規模没入ディスプレイを構築する上で有効であったと言える．

ハードウェアの他に，第3章ではバーチャル環境を構築するソフトウェアのうちレンダリング処理が没入ディスプレイに特有であるとし，スクリーン形状に依存しない全周立体映像生成手法と投影歪み補正のアルゴリズムを提案した．このアルゴリズムを用いて LargeSpace のレンダリング処理を実装したところ，平面，円柱面，トーラス面を持つ複合曲面スクリーンでも，そのサーフェスモデルとプロジェクタパラメータを設定することで適切に投影歪みを解消でき，体験者に正しい見えを提示できることが確認できた．また同章の提案の中で，前述のレンダリング処理を追加するだけで没入ディスプレイへの表示に対応可能であるとしたが，実際に Unity 用のモジュールとしてレンダリングアルゴリズムを実装し，そのモジュールを導入するだけでゲーム用として用意したバーチャル環境を没入ディスプレイ上に適切に描画可能であることを示した．

以上より，ソフトウェアに関する提案についても，大型没入ディスプレイの実装において有効に機能したと言える．

7.2 大規模没入ディスプレイが生成する バーチャル環境の有用性と課題

7.2.1 大規模没入ディスプレイを用いることの意義

ここで、アプリケーションを実装・公開することで確認された、大規模没入ディスプレイの価値について述べる。

まず、実際の歩行移動によってバーチャル空間内を移動できる点が従来の没入ディスプレイにはない大きな価値であることが確認された。従来、歩行を伴う体験をバーチャル空間で再生しようとするとき、第1.1節であげたように自然歩行とトレッドミル歩行の違いについて十分に議論する必要があった。第6章では実験心理学への応用例として道路横断実験のバーチャルな環境を実現するアプリケーションを実装したが、実際に道路横断に必要な距離を歩行できるだけの広さを持つ大規模没入ディスプレイを用いることで、自然歩行とトレッドミル歩行の違いについての懸念を原理的に解消することができた。ここで開発したバーチャル実験環境は、歩車共有空間における高リスク移動体の検出とリスク評価に関する技術の一部として特許出願済み（特願2018-112206）であり、これを利用した研究も開始され心理学実験のプラットフォームとしての成果を残しつつある [48]。これらは、拘束感が無い状態で十分な広さを自然歩行できるという特徴によって実現される応用例であり、この特徴こそが大規模没入ディスプレイの価値であるということが示されたと考える。

また大規模没入ディスプレイは歩行面のみならず、上下の空間についても広く利用できる。LargeSpaceではワイヤー駆動モーションベースを導入しその上空も移動可能にすることで、これまで実現されてこなかった立体的な移動を伴う実験や表現が可能になった。実際に Bird Song Diamond Project においては、演者が鳥の群とともにバーチャル空間を浮遊するというこれまでにない表現を実現した。さらに、立体移動のための新奇的な飛行インタフェースの研究にも LargeSpace の広大な空間とワイヤー駆動モーションベースが活用された例もある [49]。これらは立体的に利用可能な実験空間を構築したからこそ実現可能となった芸術表現あるいは研究成果であり、上下にも移動可能な空間を持つ大規模没入ディスプレイの利用価値の一つであると言える。

広い体験空間をもつということは、より多くの体験者がバーチャル空間に同時に没入できるということでもある。水平方向全周で同時に立体視が可能であるレンダリングアルゴリズムが実装されていることも、この複数名での空間共有を容易にしている

と言える。没入型インスタレーションにおいては多くの参加者が空間を共有し、バーチャル空間での鳥やハエの動きを楽しんでいる様子が確認できた。また互いにバーチャル空間内で会話している様子も確認されたが、これはバーチャル空間が複数名で共有されているからこそ起きる事象であり、没入ディスプレイの有する空間共有容易性が顕在化した結果であると考ええる。以上より、一般的な没入ディスプレイの特徴であるバーチャル空間の共有容易性については大規模没入ディスプレイでも見られ、従来より多くの体験者が同時に空間を共有ができるという点で有用であると言える。

7.2.2 視覚提示の品質に関する課題

本研究において開発された LargeSpace では、トラッキングされている体験者から見て正しい見えを生成できていることが確認された。ここに、その視覚提示の品質をより向上させるために解決すべき課題を挙げる。

品質向上のための課題

- 1) レンダリングアルゴリズムへの入力値と実際の値の誤差による映像歪み
- 2) スクリーンのフレネル反射による像の欠損
- 3) 内部相互反射によるコントラストの低下
- 4) 視体積分割数最適化による高品質化とそれに伴う処理負荷の増加

提案したレンダリングアルゴリズムには、設定情報として事前にスクリーンのサーフェスモデルとプロジェクタパラメータを入力する。1)の誤差とは、設計データ上のスクリーン形状と実際に構築されたスクリーン、データ上のプロジェクタパラメータと実際のパラメータの差を指している。CADなどによる設計時の情報と実測値との間に誤差があるという問題はどのような装置の設計・実装にも当てはまるが、システムが大規模なものになればなるほど当然その差が開きやすい。したがって、大規模没入ディスプレイにおいてはその誤差が大きくなるため、その差を埋めるための修正が必要となる。LargeSpaceでのレンダリングアルゴリズムの実装において、プロジェクタの位置・姿勢の修正に関してはUnityEditorのGUI操作により調節可能であるものの、より大規模でプロジェクタの数が増える場合などは、そのパラメータ同

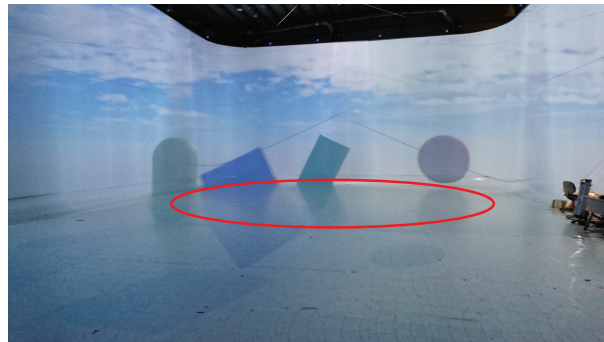


Fig. 7.1: Fresnel reflection on floor screen

定を自動化する必要があるが出てくる。スクリーン形状についても、サーフェスモデルを実測値にあわせて修正するのは容易ではない。プロジェクタパラメータの同定のみであれば、山崎らのシームレス接続技術を用いることも可能であるが、この手法は実物のスクリーン形状が理想的であることを仮定している [50]。したがって大規模没入ディスプレイに対応させるためには、正確なスクリーン形状の計測が事前に必要になるであろう。

2) のフレネル反射とは、屈折率が異なる物質同士の境界を光が進む時、その光の一部に対して生じる反射のことである。フレネル反射の量は屈折率の差と入射角に依存する。湖の遠方の水面をみると鏡のようになっていて山などが反射して見えることがあるが、これがフレネル反射である。この反射は水のような透明な物質の他に、光沢成分をもつ物体の表面でも発生する。Fig. 7.1に示す LargeSpace 内の見えにおいて、楕円で囲った領域付近の床面スクリーンでフレネル反射が発生し、壁面スクリーンの映像が見えてしまうことで本来床面に表示されるべき映像が見えなくなっていることが確認できる。床面スクリーンは、重量のある実験装置や体験者の激しい運動も想定して体育館用の白いタイルで構成されており、スクリーン用素材と比較して光沢成分が多く含まれているため、フレネル反射が強く発生したものと推察される。大規模な装置になるほど体験者から壁面までの距離が遠くなり、遠い水面を眺めるときのように床面の反射は強くなる。したがって、光を拡散させる素材を用いるなど対策が必要となる。実際のところこのような対策を行ったとしても光沢成分を一切含まない状態は作り出せないため、微量ながらも物体表面で必ずフレネル反射が発生する。没入ディスプレイをさらに大規模化する場合は、この問題の解決が必要になると考えられる。

3) のコントラストの問題は、投影光がスクリーン内部でバウンスし全体を明るく照

らしてしまうことに原因があり，没入ディスプレイ一般において発生する問題であると言える．特に前面投射型では不透明なスクリーンを使うことで光の逃げ場がなくなり，いわゆる黒浮きが強く発生してコントラストの低下が顕著に見られる．この対策としては，反射ゲインの低いスクリーン素材を用いることで余分な光の反射を抑えることが挙げられるが，スクリーンゲインが低すぎても表現可能な輝度階調が少なくなり画質を落とすこととなるため，微妙な調整が必要となることが予想される．この他に画像処理による対策も考えられる．画像全体が明るい場合は全体の輝度を下げたり，トーンカーブによって階調を最適化するという方法が挙げられるが，これらの方法でコントラストを高める場合は，輝度の高い部分または低い部分どちらかの階調を犠牲にする必要があり，コンテンツごとに強調する輝度範囲の調整が必要になると考えられる．この画像処理による対策に関しては，今回バーチャル環境構築ソフトウェアとして利用した Unity に LUT(Look Up Table) と呼ばれる描画色のリマップ機能があるため，これを用いることで比較的容易に描画後の画像処理を実現できる可能性がある．

4) の視体積分割に関しては，より細分化されたスリットとして描画することでよりよい結果が得られる可能性がある．分割数が少ない場合，なおかつ描画物体が視点位置から近い場合には，隣り合う視体積における描画距離の差が顕著になり，描画対象に意図しない切れ目が現れることが確認されている．この問題に対しては，分割数を増やしより細かいスリットとして全周を描画することで，隣り合う視体積における描画距離のギャップを小さくすることができる (Fig. 7.2)．Fig. 7.3は，全周ステレオレンダリングの際の回転中心から 20cm 離れた位置に浮かぶ直径 10cm の球を，視体積の境目になるように配置しレンダリングした例である．分割数が多くなるほど，

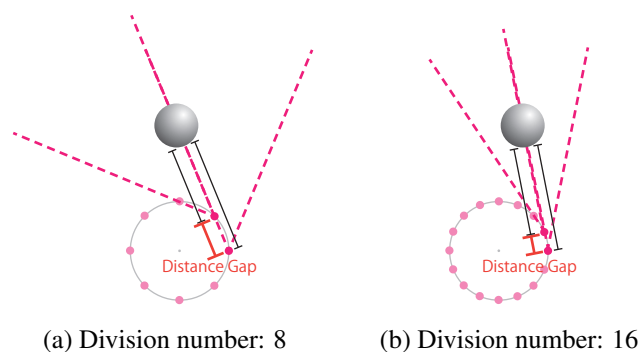


Fig. 7.2: Difference in distance of adjacent view volumes

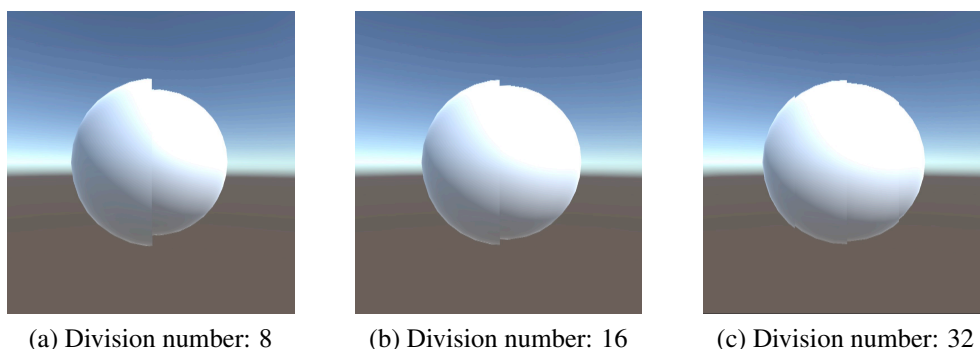


Fig. 7.3: Break of virtual object by visual volume division method

切れ目が目立たなくなることがわかる。理想的には、全周ステレオ画像を描画していくレンダバッファの水平方向画素数と同数の分割ができれば、必要十分な細分化がなされていると言える。今回の実装では処理負荷の関係上8分割としたが、6.2.1節でも触れた通り、この分割数 n が増加するとレンダリングの回数が $O(n)$ で増加する。この負荷の増加は描画フレームレートの低下につながるが、今後計算機の並列化や処理速度向上などのハードウェアの強化によって解消されることが考えられる。ソフトウェア面での現状可能な対策としては、全周ステレオ画像を描画するためにバーチャルカメラを並進回転させている処理を、現在のCPUでの計算からGPU内で完結するようジオメトリシェーダによる頂点移動などで実装し直すことが挙げられる。これを実現すれば、描画の際に発行されるCPUからGPUへの描画命令数が減り、全体として処理時間が減少することが期待される。

7.3 本研究の展望

7.3.1 LargeSpaceを活用するアプリケーションの広がり

従来、没入ディスプレイを使用するためにはCGに関する専門的なプログラミング知識が必要であったが、本研究にてUnityで使用可能なレンダリングモジュールを実装したことで、コンテンツ開発の難易度が下がったと考えている。これにより、これまで没入ディスプレイの使用を考えたことがなかった分野における潜在的な需要が見つかることが期待される。本研究では実験心理学や芸術の分野でのアプリケーションを実装したが、スポーツなどの体を大きく動かす分野や、物理学、医療といった大規模な

可視化が要求されるような分野に関しても利用価値があると考えている。現在 Unity 用レンダリングモジュールは、筑波大学の 5 年一貫性博士課程であるエンパワーメント情報学プログラムの授業を通して大学院 1 年次生に提供されており、誰でも十分容易に利用可能であることが確認できれば、インターネット上で公開し、LargeSpace を用いたコンテンツ開発の裾野を広げたいと考えている。

7.3.2 異なる投影系とバーチャル環境構築ソフトウェア

今回実装したレンダリングアルゴリズムは、没入ディスプレイ一般に適用可能である。これはすなわち、Unity 用レンダリングモジュールへの入力としてスクリーン形状とプロジェクタパラメータを定義することができれば、従来の没入ディスプレイについても Unity でバーチャル環境を構築できるようになるということである。従来の没入ディスプレイはそれぞれが別々にバーチャル環境を定義する方法を持ち、同一のコンテンツを異なる没入ディスプレイで再生するのは容易ではなかった。しかし今回開発したレンダリングモジュールに複数の没入ディスプレイが対応することで、異なるディスプレイ間でのコンテンツの使い回しが容易になる。これによってバーチャル環境構築の手間が省けるうえに、コンテンツのみを配布するということも可能になる。インターネット上でコンテンツを公開しそれをダウンロードすることで手元のデバイスで再生するというコンテンツ共有の方法は、市販の HMD を用いた VR 体験ではすでに実現されている。開発したレンダリングモジュールの導入が進むにつれて、このコンテンツ共有が没入ディスプレイにおいても可能になっていくことが期待される。

7.3.3 大規模没入ディスプレイの展開

大規模な没入ディスプレイによって実現する、繰り返し再生可能な等身大映像で構成されたバーチャル環境は、今後都市開発や災害シミュレーション、宇宙開発など様々な分野で活用されることが期待される。特に災害状況の再現に関しては、広い移動可能空間を活かし実際に人が歩行移動できる避難行動シミュレーションおよびモデル化の環境として研究が進むと考えられる。本研究においても高潮の災害シミュレーションを実装したが、従来より、危険な災害現場での被災者の避難行動分析や避難訓練の目的でバーチャルリアリティ技術を用いた災害避難シミュレータが開発されてきている。しかしそれらの多くは避難時の基本的な移動手段である歩行が再現できてい

ない。大規模没入ディスプレイは、この歩行移動の要求を満たすことができ、なおかつ拘束感も少ないため、より自然な状態で避難者行動モデルの構築に必要な実験を実施できると言える。船舶における避難者行動モデルを構築した金湖ら [51] にならい、様々な経路条件を用意したバーチャルな災害現場で実験参加者がどの方向に進もうとするかを確かめることで、これまで被災者へのインタビューなどによってしか構築できなかった災害直下で極限状態の被災者の経路選択モデルを実験検証し、それをより正確なものに修正できる可能性がある。

さらに大規模没入ディスプレイの利用障壁が十分に低くなれば、上記の実験心理学におけるプラットフォームとも言える展開に加えて、芸術分野において没入体験の再生装置として広く活用されるようになる可能性がある。コンピュータグラフィックスはすでに芸術表現のためのツールとして広く利用されているが、これを全周化しインタラクション可能にすることで、体験・経験による表現へと拡張できる。その再生に大規模没入ディスプレイを用いることで、体験を多人数で共有できるようになる。大規模没入ディスプレイが気軽に誰でも利用可能になることで、文章、音楽、絵画などと同様の表現の手段として“没入体験”というフォーマットを、誰しものが活用できるようになる可能性があると言えよう。

第8章 総括

8.1 研究要略

本研究は人間の視覚刺激を生成する没入ディスプレイについて、その大規模化における設計指針を示し、それに基づくハードウェア実装と視覚刺激生成手法について検討および提案するものである。

第1章では、従来の視覚提示に関する研究について概説し、没入ディスプレイの特徴と解決すべき課題について整理した。また、本研究の目的を、没入ディスプレイにおける移動可能範囲の制限についてシステムの大型化によって解決することとした。

この目的の達成のために、第2章では大規模な没入ディスプレイを構築することを前提としたときに必要となるハードウェアの設計指針について議論した。まず没入ディスプレイを設計する際に考慮すべき事柄として、提示視野角の広さ、両眼視差実現、運動視差の実現を挙げ、さらに大規模システム特有の要件として、装置全体に占める体験空間の割合を高める必要があることを挙げた。これを実現する装置を設計する上で検討すべき項目と現状の最適構成が以下の通りであることを述べた。また、大規模化における前面投射方式が優位になる条件について議論した。

大規模装置設計において検討すべき項目と最適構成

- 投影方式 : 前面投射方式
- プロジェクタ配置 : 投影スクリーンに対し、逆のスクリーン上端
- スクリーン形状 : 複合曲面型
- 視点位置トラッキング : 光学式

第3章では、没入ディスプレイに実装すべきバーチャル環境構築ソフトウェアについて、それを構成する要素について述べた後、レンダリング処理に注目し、没入ディスプレイ一般に適用可能なアルゴリズムを提案した。この一連のレンダリング処理により、曲面を含むような複雑な形状を有する没入ディスプレイにおいても、スクリーンサーフェスモデルとプロジェクタパラメータを入力するだけで、水平方向全周における立体視とトラッキングされた体験者に対する歪みのないバーチャル空間のみえを提示可能であるとした。本提案は、従来の歪み補正で必要とされていたスクリーンの法線情報やワープ変形による映像歪みの設定が不要となる分、事前準備が簡略化されている。

第4章では、ここまで提案してきたハードウェア、ソフトウェアの設計指針に則り、実際に大規模没入ディスプレイ **LargeSpace** を実装した。本装置にバーチャル空間をレンダリングした上でスクリーン内部を歩行した際の体験者の視界変化を連続画像で示し、歩行移動に合わせてバーチャル空間の見えが正しく生成されていることを確認した。また、ゲームエンジン上で先のレンダリングアルゴリズム実装し統合することで、汎用性の高いバーチャル環境構築ソフトウェアを開発した。

第5章では **LargeSpace** の評価として、有効画素数、有効視野角、角分解能、体験空間容積率について述べた。また、前面投射方式を採用したことで投影光遮蔽による移動可能範囲の減少が確認されたため、実質的に移動可能な範囲を実験を通して明らかにした。複合曲面スクリーンによる輝度変化軽減効果についても議論し、曲率半径が十分に取られていれば比較的緩やかな輝度変化に抑えられることを確認した。

第6章では、大規模没入ディスプレイの応用として、移動感覚提示装置との統合による浮遊感提示、ウォークスルーアプリケーション、心理学における被験者実験のためのバーチャルな実験環境、芸術応用としての没入型インスタレーションについて触れた。いずれも、広大な実験空間があってこそ実現可能なアプリケーションであり、大規模没入ディスプレイの利用可能性が示された。

第7章では、全体を通じた考察を行った。まず提案した設計手法について、**LargeSpace** の実装とその応用によって有用性が確認できたとした。次に、大規模没入ディスプレイがもたらす価値について議論し、拘束感がない状態で十分な広さを歩行できる点、さらには前後左右だけではなく上下にも移動可能である点をあげた。大きな移動を伴う心理実験もバーチャル空間内で実施できることや、これまで実現できなかった芸術表現が実装できることが、大規模没入ディスプレイを利用する価値である。その後、大規模没入ディスプレイにおける視覚提示の品質に関する課題を4点指摘し、解説し

た．さらに本研究の展望として，LargeSpace のアプリケーション，バーチャル環境構築ソフトウェア，そして大規模没入ディスプレイ一般についての今後の可能性について言及した．

8.2 結言

本論文では，没入ディスプレイにおける移動可能範囲の制限について，システムの大規模化によって解決することを目指した．このために，没入ディスプレイの大規模化における設計指針をハードウェア，ソフトウェアの両面から示し，LargeSpace の実装をもってその手法の有効性を実証した．その中で，没入ディスプレイ一般に適用可能なバーチャル環境構築ソフトウェアを開発し，没入ディスプレイにおけるコンテンツ開発の効率化，開発難度の易化を実現した．また，大規模没入ディスプレイの応用としてアプリケーションを複数実装し，その利用可能性を示した．以上によって得られた大規模没入ディスプレイに関する研究結果は，没入ディスプレイによる視覚提示の諸問題を完全に解決するものではないが，この分野の研究に対して新たな知見を加えるものである。

謝辞

本研究は著者が2014年4月から2019年3月にわたり、筑波大学グローバル教育院エンパワーメント情報学プログラム一貫性博士課程在学中に行ったものである。この期間中多くの方々から賜った御指導、御協力、御支援に心より感謝の意を表したいと思う。

とりわけ、筑波大学 岩田洋夫教授および矢野博明教授には研究活動全般にわたり格別なる御指導と御高配を賜り、衷心より深く感謝する次第である。研究のまとめに際しては、パナソニック株式会社 野村淳二先生、筑波大学 葛岡英明教授、村上史明助教、山田亜紀助教に貴重なご教示、示唆に富むご助言を賜った。深く感謝申し上げる。

また、システムの構築にあたっては、終始御助言、御助力を頂いた圓崎祐貴助教に感謝したいと思う。毎週のミーティングにて多くの有益なご助言をいただいた橋本悠希助教にも感謝の意を表したい。

さらに研究生生活において、筑波大学 EMP 事務室の職員の皆様には研究活動に対してあたたかい応援の言葉をかけていただくなど、事務手続きのみに収まらず御支援いただいた。厚く御礼申し上げます。また、プログラム第1期生として入学し、共に講義をうけ、課外研究活動をし、切磋琢磨してきたエンパワーメント情報学プログラムの同輩に、心から感謝申し上げます。そして、研究室内外の生活を共にし、実験や研究デモンストレーションなどの際にも快く協力して頂いた筑波大学バーチャルリアリティ研究室の先輩、同輩、後輩諸氏に感謝したいと思う。

最後に、遠く故郷より研究生生活を支えてくれた家族に感謝の意を表し、本論文の謝辞とする。

2019年3月
高鳥 光

参考文献

- [1] 昭宏八木. 知覚と認知. 現代心理学シリーズ, No. 6. 培風館, 1997.
- [2] Ivan E. Sutherland. A head-mounted three dimensional display. In *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I, AFIPS '68 (Fall, part I)*, pp. 757–764, New York, NY, USA, 1968. ACM.
- [3] Starvr news & blog, 2018. <https://www.starvr.com/news/35/> [Online; accessed 3-Dec-2018].
- [4] 清川清, ビリングハーストマーク, ベルチャダニエル, グプタアルナブ. 拡張現実感インタフェースを用いた対面協調作業のコミュニケーション過程. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 159–168, 2002.
- [5] Carolina Cruz-Neira, Daniel J Sandin, and Thomas A DeFanti. Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the cave. In *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 135–142. ACM, 1993.
- [6] M. Hirose. Cabin-a multiscreen display for computer experiments. In *Proceedings. International Conference on Virtual Systems and MultiMedia VSMM '97 (Cat. No.97TB100182)*, pp. 78–83, Sept 1997.
- [7] 山田俊郎, 棚橋英樹, 小木哲朗, 廣瀬通孝. 完全没入型6面ディスプレイ cosmos の開発と空間ナビゲーションにおける効果. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 3, pp. 531–538, 1999.
- [8] 日本バーチャルリアリティ学会, 舘璋, 佐藤誠, 広瀬通孝. バーチャルリアリティ学. 工業調査会, 2010.

- [9] 柴野伸之, 澤田一哉, 竹村治雄. マルチプロジェクタを用いたスケーラブル大型ドームディスプレイ cyberdome の開発. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 3, pp. 327–336, 2004.
- [10] Tetsuro Ogi. Characteristics of immersive projection displays and their applications (in japanese). *The Transactions of Human Interface Society*, Vol. 1, No. 4, pp. 43–49, 1999.
- [11] Theater 360 taiyokikaku r&d, 2018. <http://taiyo-rd.com/works/theater-360> [Online; accessed 3-Dec-2018].
- [12] Ed Lantz. A survey of large-scale immersive displays. In *Proceedings of the 2007 Workshop on Emerging Displays Technologies: Images and Beyond: The Future of Displays and Interacton*, EDT '07, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [13] Virtual reality api software for developers - cavelib by mechdyne, 2018. <https://www.mechdyne.com/software.aspx?name=CAVELib> [Online; accessed 3-Dec-2018].
- [14] getreal3d software - connect gaming engines & virtual reality, 2018. <https://www.mechdyne.com/software.aspx?name=getReal3D+for+Unity> [Online; accessed 3-Dec-2018].
- [15] Allen Bierbaum, Christopher Just, Patrick Hartling, Kevin Meinert, Albert Baker, and Carolina Cruz-Neira. Vr juggler: A virtual platform for virtual reality application development. In *Proceedings of the Virtual Reality 2001 Conference (VR'01)*, VR '01, pp. 89–, Washington, DC, USA, 2001. IEEE Computer Society.
- [16] A. Febretti, A. Nishimoto, V. Mateevitsi, L. Renambot, A. Johnson, and J. Leigh. Omegalib: A multi-view application framework for hybrid reality display environments. In *2014 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 9–14, March 2014.
- [17] 大野隆造, 片山めぐみ, 小松崎敏紀, 添田昌志. 歩行動作と連動する視環境シミュレータを用いた距離知覚に関する研究. 日本建築学会計画系論文集, Vol. 66, No. 550, pp. 95–100, 2001.

-
- [18] H. Iwata and T. Fujii. Virtual perambulator: a novel interface device for locomotion in virtual environment. In *Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 60–65, March 1996.
- [19] H. Iwata. The torus treadmill: realizing locomotion in ves. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 19, No. 6, pp. 30–35, Nov 1999.
- [20] H. Iwata, H. Yano, and F. Nakaizumi. Gait master: a versatile locomotion interface for uneven virtual terrain. In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2001*, pp. 131–137, March 2001.
- [21] 久保晃. トレッドミルの歩行速度の知覚について. 理学療法のための運動生理, Vol. 6, No. 1, pp. 33–38, 1991.
- [22] 山下俊明, 富永吉隆, 吉田正樹. 平地歩行とトレッドミル歩行の比較. 電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティックス, Vol. 106, No. 506, pp. 21–24, Jan 2007.
- [23] 西田裕介, 樋口謙次, 啓利英樹. トレッドミル平地歩行と室内平地歩行の相違—生理的反応と主観的運動強度での検討—. 理学療法科学, Vol. 13, No. 4, pp. 199–204, 1998.
- [24] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald, H. Frenz, and M. Lappe. Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 16, No. 1, pp. 17–27, Jan 2010.
- [25] T. Peterka, R. L. Kooima, J. I. Girado, J. Ge, D. J. Sandin, A. Johnson, J. Leigh, J. Schulze, and T. A. DeFanti. Dynallax: Solid state dynamic parallax barrier autostereoscopic vr display. In *2007 IEEE Virtual Reality Conference*, pp. 155–162, March 2007.
- [26] Yutaka Kunita, Naoko Ogawa, Atsushi Sakuma, Masahiko Inami, Taro Maeda, and Susumu Tachi. Immersive autostereoscopic display for mutual telepresence: Twister i (telepresence wide-angle immersive stereoscope model i). In *Virtual Reality, 2001. Proceedings. IEEE*, pp. 31–36. IEEE, 2001.

- [27] Daniela Kuka, Oliver Elias, Ronald Martins, Christopher Lindinger, Andreas Pramböck, Andreas Jalsovec, Pascal Maresch, Horst Hörtner, and Peter Brandl. Deep space: High resolution vr platform for multi-user interactive narratives. In Ido A. Iurgel, Nelson Zagalo, and Paolo Petta, editors, *Interactive Storytelling*, pp. 185–196, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer Berlin Heidelberg.
- [28] 橋本渉, 岩田洋夫. 凸面鏡を用いた球面没入型ディスプレイ : Ensphered vision(<特集> プロジェクション型没入ディスプレイ). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 3, pp. 479–486, 1999.
- [29] Tetsuro Ogi, Masahiro Hayashi, and Tetsuro Fujise. Development of cc room and non-distorted image projection method (in japanese). *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, Vol. 11, No. 3, pp. 387–394, 2006.
- [30] Naoki Hashimoto, Shouichi Hasegawa, and Makoto Sato. A development of multi-projection display “d-vision”. *The Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers*, Vol. 58, No. 3, pp. 409–417, 2004.
- [31] Katsuto Nakagawa, Hiroaki Yano, and Hiroo Iwata. Development of rear projection full surround spherical display by using stereoscopic 3d ultra-short focus projectors (in japanese). In *Proceedings of the Virtual Reality Society of Japan, Annual Conference*, Vol. 18, pp. 104–107. The Virtual Reality Society of Japan, 2013.
- [32] Morgan McGuire. Computer graphics archive, 2017. <https://casual-effects.com/data> [Online; accessed 25-Nov-2018].
- [33] Ramesh Raskar, Greg Welch, Matt Cutts, Adam Lake, Lev Stesin, and Henry Fuchs. The office of the future: A unified approach to image-based modeling and spatially immersive displays. In *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 179–188. ACM, 1998.
- [34] Unity, 2018. <https://unity3d.com/> [Online; accessed 22-Dec-2018].
- [35] “unity” in deep space 8k, 2015/10/15. <https://ars.electronica.art/aeblog/en/2015/10/15/unity-deep-space-8k/> [Online; accessed 22-Dec-2018].
- [36] 広瀬通孝. バーチャル・リアリティ. 産業図書, 1993.

- [37] 広瀬通孝, 大塚隆治, 広田光一. モーションベースを利用した前庭感覚表現に関する基礎的研究. 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol. 1, No. 1, pp. 16–22, 1996.
- [38] 井口雅一, 平松金雄. シミュレータへの人工現実感の応用. バーチャル テック ラボ, 1992.
- [39] D. STEWART. A platform with six degrees of freedom. *Proc, Inst. Mech. Eng. London, Part 1*, Vol. 180, pp. 371–386, 1965.
- [40] 茅原拓朗, 北崎充晃. Vr を利用した心理実験室の動向と心理学の未来. 日本バーチャルリアリティ学会誌 = Journal of the Virtual Reality Society of Japan, Vol. 8, No. 3, pp. 139–144, sep 2003.
- [41] BEN HAMILTON-BAILLIE. Shared space: Reconciling people, places and traffic. *Built Environment* (1978), Vol. 34, No. 2, pp. 161–181, 2008.
- [42] 谷口綾子, 吉村聡哉, 石田東生. 車両と歩行者・自転車間のコミュニケーションによる協調行動の生起に関する研究. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 68, No. 5, pp. I.1115–I.1122, 2012.
- [43] 関谷直也, 田中淳. 避難の意思決定構造-日本海沿岸住民に対する津波意識調査より-. 自然災害科学 S03, Vol. 35, 特別号, pp. 91–103, 2016.
- [44] 板宮朋基, 吉村達之. 複合現実による災害想定没入体験アプリ disaster scope の開発と避難訓練における活用. 災害情報 = Journal of disaster information studies : 日本災害情報学会誌, No. 16, pp. 191–198, jul 2018.
- [45] C. Sommerer and L. Mignonneau. Creating interactive art—conceptual and technological considerations. In *Explorations in Art and Technology*, 2018.
- [46] Victoria Vesna. Birdsong diamond, 2018. <http://birdsongdiamond.com> [Online; accessed 25-Nov-2018].
- [47] Craig W. Reynolds. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *SIG-GRAPH Comput. Graph.*, Vol. 21, No. 4, pp. 25–34, August 1987.

- [48] Makoto Itoh, Hikaru Takatori, Sari Yamamoto, and Masayuki Kawamoto. Managing the risks of accidents by platooning small public transport in shared space. In *Proceedings of ITS AP Forum 2018 Fukuoka*, pp. 0036–0045, 2018.
- [49] M. Perusquía-Hernández, T. Enomoto, T. Martins, M. Otsuki, H. Iwata, and K. Suzuki. Embodied interface for levitation and navigation in a 3d large space. In *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference, AH '17*, pp. 4:1–4:9, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [50] 山崎真見, 皆川剛, 武田晴夫, 長谷川晶一, 橋本直己, 佐藤誠. 複合曲面スクリーン上での投射映像シームレス接続技術. 映像情報メディア学会誌: 映像情報メディア = The journal of the Institute of Image Information and Television Engineers, Vol. 57, No. 11, pp. 1543–1550, nov 2003.
- [51] 富士夫金湖, 義範池本. 避難シミュレータ実験による避難者モデルの開発. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 5, No. 3, pp. 1041–1048, 2000.

公表論文リスト

査読付き雑誌論文

- 1) 西田 惇, 松田 壮一郎, 大木 美加, 高鳥 光, 佐藤 綱祐, 鈴木 健嗣, “身体性変換スーツによる小児体験における知覚・運動特性の評価”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.23, no.3, pp.149–158, 2018.
- 2) 佐藤 綱祐, 西田 惇, 高鳥 光, “CHILDHOOD: 小児の体験を再現する装着型身体性変換スーツ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.22, no.1, pp.71–80, 2017.
- 3) 高鳥 光, 圓崎 祐貴, 矢野 博明, 岩田 洋夫, “大規模没入ディスプレイ LargeSpace の開発”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.21, no.3, pp.493–502, 2016.

査読付き国際会議論文

- 1) Hikaru Takatori, Masashi Hiraiwa, Hiroaki Yano, Hiroo Iwata, “Large-Scale Projection-Based Immersive Display: The Design and Implementation of LargeSpace”, Proceedings of IEEE VR, 2019. [in press]
- 2) Makoto Itoh, Hikaru Takatori, Sari Yamamoto, Masayuki Kawamoto, “Managing the risks of accidents by platooning small public transport in shared space”, Proceedings of ITS AP Forum 2018 Fukuoka, pp.36–45, 2018.
- 3) Hiroo Iwata, Yu-ta Kimura, Hikaru Takatori, Yu-ki Enzaki, “Big Robot Mk.1A,” Proceeding SIGGRAPH '16 ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies, pp.2:1–2:2, 2016.

- 4) Hikaru Takatori, Hiroaki Yano, Hiroo Iwata, “Panoramic Movie-Rendering Method with Superimposed Computer Graphics for Immersive Walk-Through System,” Haptic Interaction, Lecture Notes in Electrical Engineering vol.277, pp.277–284, 2015.
- 5) Hikaru Takatori, Hiroaki Yano, Hiroo Iwata, “Prototype of Evacuation Simulator using TorusTreadmill and Spherical Immersive Display,” Proceedings of 10th AEARU Workshop on Computer Science and Web Technology (CSWT-2015), pp.81–82, 2015.
- 6) Akihiko Shirai, Jun Nishida, Takahiro Sato, Kosuke Sato, Hikaru Takatori, Susumu Tachi, “Innovation in the age of virtual reality through organizing international student competition,” Proceedings of SIGGRAPH ASIA 2015 Symposium on Education (SA’15), pp.8:1–8:3, 2015.
- 7) Jun Nishida, Hikaru Takatori, Kosuke Sato, Kenji Suzuki, “CHILDHOOD: Wearable Suit for Augmented Child Experience,” Proceeding of SIGGRAPH ’15 ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies, p.7:1, 2015.
- 8) Jun Nishida, Hikaru Takatori, Kosuke Sato and Kenji Suzuki, “CHILDHOOD: Wearable Suit for Augmented Child Experience,” Proceedings of the 2015 Virtual Reality International Conference, pp.22:1–22:4, 2015.

付 録 A Unity 用 LargeSpace ライブラリの利用手順

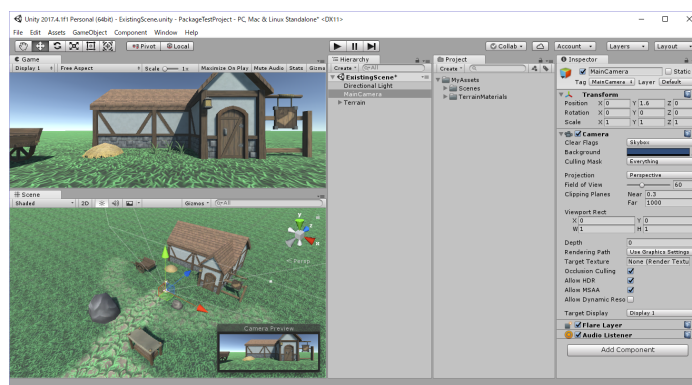
LargeSpace に適切な表示を行うための Unity 用アセット, LargeSpaceProjectionAssets の利用手順を記載する。

A.1 Development Environment

- Windows 10
- Unity 2017.4.9f1

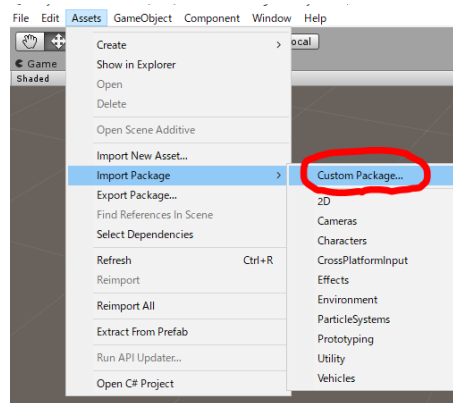
A.2 How to import the asset

1. Open your Untiy project.

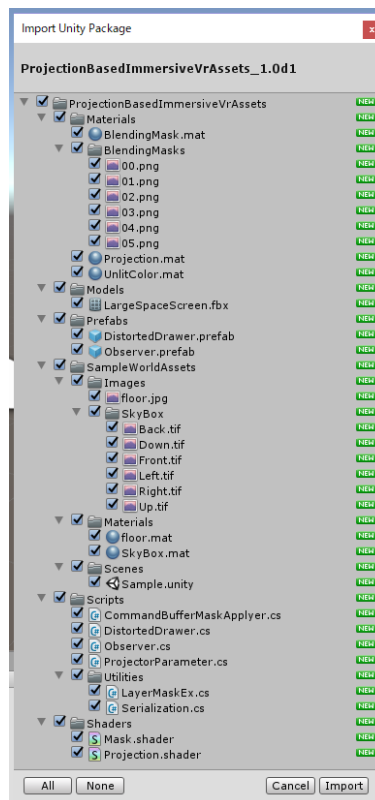


2. [Assets]->[Import Package]->[Custom Package...]

第 A 章 Unity 用 LargeSpace ライブラリの利用手順



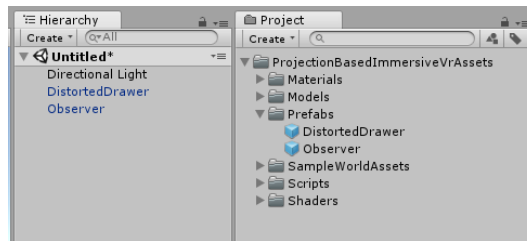
3. Import “LargeSpaceProjectionAssets_[VERSION].unitypackage”.



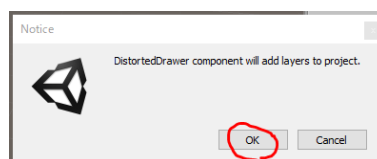
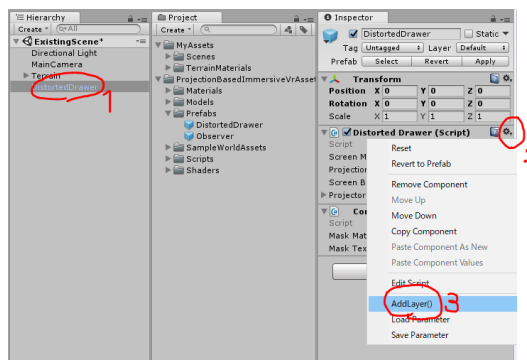
4. Delete “MainCamera”.

5. Add prefabs “**DistortedDrawerLS**”, “**ObserverLS**” and “**MotiveClientLS**”.

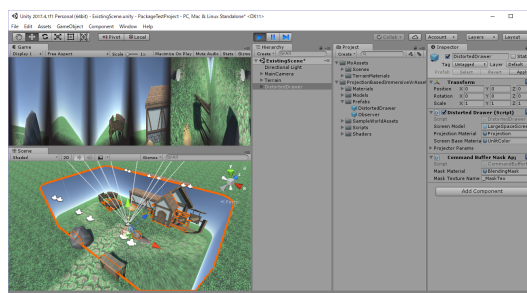
A.2 How to import the asset



6. Execute “AddLayer()” from context menu of DistortedDrawer component.



7. Play and you'll get the view like below



8. You can move “Observer” to move virtual viewpoint.